Le frottement solide sec : le frottement de glissement et de non glissement. Étude des difficultés des étudiants et analyse de manuels

Helena Caldas

THESE

présentée à l'UNIVERSITE PARIS 7 par

HELENA CALDAS

pour obtenir le

DIPLOME DE DOCTORAT

(DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE)

LE FROTTEMENT SOLIDE SEC: LE FROTTEMENT DE GLISSEMENT ET DE NON GLISSEMENT. ETUDE DES DIFFICULTES DES ETUDIANTS ET ANALYSE DE MANUELS

Soutenue le 21 mars 1994 devant la commission d'examen composée de:

M. J. P. GAZEAU	**Président**
Mme M. G. SERE	**Rapporteur**
M. M. SEQUEIRA	**Rapporteur**
M. J. GATECEL	
Mme E. SALTIEL	**Directeur de thèse**

LABORATOIRE DE DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Recherche financée par le CNPq - BRASILIA - BRESIL

Je tiens ici à remercier **TOUS les membres du L.D.P.E.S.** pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé lors de mon arrivée, et pour le soutien constant qu'ils m'ont apporté dans l'élaboration de cette thèse. Je remercie tout particulièrement **L. VIENNOT** et **G. REBMANN** pour les lectures rigoureuses qu'ils ont faites et les critiques constructives qu'ils ont formulées et qui m'ont été, il va sans dire, d'un grand service. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **J. MENIGAUX** pour avoir su mettre judicieusement à ma disposition des articles dont l'intérêt fut capital pour ce travail. Que toute cette "famille" trouve ici ma gratitude pour m'avoir acceptée comme l'une des leurs.

Enfin, figure omniprésente, un grand, très grand merci à **E. SALTIEL** pour tout le temps, inquantifiable tant il fut grand, toute l'énergie, toute la patience, toute la magnifique aide et compétence mises au service de ce travail. Pourrais-je jamais trouver les mots?

D'autres personnes, vennant d'autre lieux, ont contribué sous des formes diverses à apporter qui un éclairage nouveau, qui des données fondamentales. Je pense notamment à **B. PERRIN**, dont la lecture critique de la thèse et les nouvelles questions qui en ont découlé, toutes très justes, ont permis d'affiner, voire de modifier, certaines propositions et en cela je lui suis très reconnaissante.

Merci à tous les enseignants d'ici ou d'ailleurs qui ont bien voulu consacrer de leur temps précieux à soumettre leurs étudiants à plusieurs séries de questionnaires dont les résultats, on s'en doute, sont à la base de cette recherche. Bien entendu, je tiens également à remercier leurs étudiants qui se sont prêtés au "jeu".

Je remercie vivement **J.P. GAZEAU** qui a accepté de présider le jury de cette thèse. Qu'il soit ici remercié de l'intérêt porté à mon travail.

Ma gratitude s'adresse aussi à **M. G. SERE** et à **M. SEQUEIRA** qui ont bien voulu consacrer leur temps et leur compétence à analyser et à juger ce travail et à m'honorer de leur présence à ce jury.

Je tiens également à remercier **J. GATECEL** qui m'a fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury et qui m'a permis de bénéficier de ses conseils.

Enfin, last but not least!, un merci tout plein de tendresse pour mon fils **RODRIGO** qui a su ô combien patiemment faire face à une maman pas toujours très disponible et d'humeur inégale!

MERCI A TOUS.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION

1- Contexte didactique de l'étude

Il paraît presque banal de dire que ceux qui apprennent, les "apprenants", possèdent déjà, avant tout apprentissage, des connaissances préalables qui viennent aussi bien de leurs expériences quotidiennes que de leur passé scolaire ou extra-scolaire. Piaget et Bachelard ont tous les deux, avec des approches différentes, introduit les premiers cette idée: le premier en se focalisant sur des structures logico-mathématiques, peu dépendantes, pour lui, des concepts spécifiques d'une discipline donnée, le second en définissant ce qu'il a appelé la connaissance commune, qui elle, est plus spécifique d'une discipline donnée (Bachelard, 1938; Piaget et Inhelder, 1941).

Actuellement, la communauté internationale reconnaît l'existence et l'importance des conceptions et des modes de raisonnement des apprenants. Un apprenant n'est plus, en effet, considéré comme étant un simple réceptacle dans lequel on entasse ou déverse des connaissances. De même, un cours bien construit, bien structuré n'est plus considéré comme étant suffisant pour que les connaissances acquises par l'apprenant soient elles-mêmes bien construites et structurées. Le livre écrit par S. Johsua et J.J. Dupin (1992) décrit l'état des connaissances sur ce sujet et nous y renvoyons le lecteur qui désire en savoir plus. Retenons cependant quelques caractéristiques de ces conceptions et modes de raisonnement:

- ces conceptions se manifestent souvent par des "erreurs" qui ne sont pas de simples lacunes ou absences de connaissances sur le sujet. Nous en verrons des exemples avec cette étude.
- ces conceptions ne se manifestent pas toujours, cela dépend fortement des types de situations physiques proposées.
- des conceptions différentes, voire contradictoires entre elles, peuvent cohabiter sans que cela ne gêne l'apprenant.
- certaines conceptions présentent une très grande résistance à l'enseignement.
- certaines de ces conceptions sont très stables et se retrouvent chez des publics très divers, tant par leur culture que par leurs niveaux de connaissances dans le domaine étudié.

La connaissance de ces modes de raisonnements et conceptions est reconnue être importante pour tout apprentissage car " *constituerait ainsi une large base cognitive constitutive du sens commun*" (Johsua et Dupin, 1992).

Il existe donc aujourd'hui un consensus sur l'existence de conceptions et des modes de raisonnements, sur la nécessité d'en tenir compte lors d'un apprentissage. En effet, tout individu construit son savoir à l'aide des conceptions et des modes de raisonnement qui sont à sa disposition: c'est la perspective constructiviste de l'apprentissage (Bachelard, 1938; Osborne and Wittrock, 1983; Driver and Bell, 1985; Giordan et Vechi,1987; Millar, 1989). Il existe également un consensus sur le fait que certaines conceptions sont spécifiques d'une discipline. C'est, par exemple, le cas des représentations graphiques et du formalisme vectoriel en physique: certaines recherches ont montré (Genin, Michaud-Bonnet et Pellet, 1987) que certains modèles mathématiques qui semblent être appréhendés de façon convenable par les élèves, sont difficilement transposés en physique. Le consensus s'arrête là. En effet, il existe différentes propositions ou théories de l'apprentissage, supports à des stratégies pédagogiques: "conceptual change", "concept mapping", "situations problématiques" .....sur lesquels nous ne nous étendrons pas, nous renvoyons le lecteur intéressé à la bibliographie (Posner, 1982; Novak, 1985; Driver, 1989; Sebastia 1989; Duchl,1991; Gil -Perez,1992; Hewson, 1992).

Cette étude s'inscrit dans une perspective constructiviste de l'apprentissage dans un cadre décrit par Viennot (1979): "*seule la confrontation permanente du formalisme et du réel construit une authentique pratique scientifique... Cette prise de conscience et cette confrontation sont deux démarches personnelles et actives dont l'étudiant ne peut pas faire l'économie... Il reste que l'enseignant ne peut stimuler ses étudiants dans cette voie qu'à deux conditions: avoir lui-même une connaissance sûre de la démarche spontanée déclenchée par telle ou telle situation physique et trouver les moyens d'en avertir les étudiants*". Nous avons donc cherché à connaître les "*démarches spontanées*[*] (des étudiants) *déclenchées*" par la présence du frottement solide sec dans différentes situations physiques décrites dans des questionnaires papier-crayon, en en donnant une description aussi complète et synthétique que possible, et finalement essayer de trouver "un moyen d'en avertir" les étudiants et les professeurs. Cette étude ne cherche donc pas à dégager les conceptions d'élèves n'ayant jamais appris le frottement à l'école: la population interrogée est, en effet, supposée avoir déjà étudié le frottement de façon plus ou moins approfondie.

2- Problématique générale

Le présent travail porte sur la compréhension des phénomènes de frottement de glissement (frottement cinétique) et de frottement de non glissement (frottement statique)

---

[*] démarche spontanée signifie, ici, démarche construite mais pas forcément apprise en tant que telle au lycée ou à l'université

entre les zones de contact (non lubrifiées) des solides en présence (frottement solide sec) et essaie de répondre aux questions suivantes:

- quelles sont les difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude de situations physiques de frottement et quelle description synthétique peut-on en faire?
- quels sont les éléments qui permettront d'aider les étudiants à surmonter ces difficultés et quels sont les choix pédagogiques qui en découlent?

L'essentiel de ce travail consistera à donner une description aussi simple et prédictive que possible des principales tendances du raisonnement manifesté par des publics divers et confrontés à des familles de situations physiques construites dans le but de faire jaillir ces raisonnements. Une analyse d'un grand nombre de manuels permettra de savoir s'ils contribuent ou non à renforcer ces raisonnements.

Le second objectif est de participer à alimenter une reflexion sur les objectifs de l'enseignement du frottement solide sec adaptés aux difficultés révélées par l'étude.

3- Origines de la recherche

La recherche s'est développée à partir des constats suivants:

- les difficultés rencontrées par des étudiants de première année d'université au Brésil (Vitoria) lors d'un enseignement de physique élémentaire sur les lois du frottement solide (cinétique et statique), pendant trois années consécutives.
- les propres difficultés des enseignants à résoudre celles rencontrées par leurs étudiants.
- l'absence, à notre connaissance, de recherches spécifiques sur ce thème en didactique de la physique.

4- Méthodologie

La méthodologie utilisée à l'occasion de ce travail afin de dégager les modes de raisonnements de la population concernée par cette étude sur le frottement solide est très "classique". Elle comprend quatre grandes étapes:

4-1- Première étape: une "analyse à priori"

Le terme "analyse a priori" englobe, pour nous, toutes les démarches qui sont à l'origine de l'explicitation des questions et des hypothèses de travail. Une telle analyse comprend:

- l'étude de l'état de la question du point de vue physique et du point de vue didactique. Cette étude donne déjà quelques indications sur d'éventuelles difficultés rencontrées par les étudiants dans la compréhension du phénomène physique étudié.

- une phase exploratoire où trois méthodes d'analyse ont été utilisées: une observation empirique de classe, l'analyse d'un manuel et une enquête préliminaire. A l'aide d'observations faites auprès d'étudiants brésiliens, au cours de trois années de pratique enseignante à l'université brésilienne sur les frottements, il a été possible de relever un certain nombre d'erreurs répétitives et associées à certaines catégories de situations problèmes. L'analyse du manuel de référence utilisé par les étudiants et les professeurs dans cette université a situé, de façon rudimentaire, la nature des erreurs répétitives repérées, par rapport au contenu de ce manuel. Enfin, une mini-enquête préliminaire proposée à des étudiants français du D.E.A. de didactique des sciences physiques et techniques (Paris7) et à des étudiants de maîtrise es-sciences physiques de l'Université des Antilles et de la Guyane a permis de mieux cerner les difficultés et les situations physiques qui posaient problèmes.

4-2- Deuxième étape: les questionnaires

Afin de pouvoir tester nos hypothèses, nous avons choisi de construire et de faire passer des questionnaires papier-crayon. Chaque questionnaire décrit une situation physique particulière à l'aide d'un énoncé d'exercice comprenant un minimum de chiffres et de notations. Ce type de formulation empêche les étudiants de se raccrocher à des formules "miracles" et les oblige à expliciter les éléments qu'ils utilisent pour répondre aux questions posées. Les avantages des questionnaires papier-crayon sont bien connus, nous n'insisterons pas sur ce point. Nous voudrions seulement faire remarquer que nous avons souhaité consulter des populations variées, tant par leur niveau d'enseignement que par leur langue d'origine. L' analyse de questionnaires papier-crayon envoyés au Brésil, en Espagne et au Portugal a été possible en un temps raisonnable, alors que des interviews dans ces trois pays étaient inenvisageables. Ces questionnaires, au nombre de quatre (deux pour le frottement cinétique et deux pour le frottement statique), ont été fabriqués avec l'intention de tester des hypothèses précises et non d'explorer un domaine entièrement vierge. Les questions de la plupart d'entre eux sont des questions fermées où les réponses possibles sont oui, non, je ne sais pas; cependant, la demande systématique de justifications rend ces questions plus "ouvertes". Par ailleurs, dans la plupart des questionnaires, il est demandé de représenter les forces en jeu sur un schéma. L'ensemble des réponses (oui, non, je ne sais pas), des justifications et des schémas a constitué l'essentiel de la matière sur laquelle nous avons travaillé. Les données ne sont jamais numériques (sauf pour un questionnaire de contrôle). C'est à l'aide de ce matériel que nous avons dégagé les modes de raisonnement des étudiants sur le frottement solide.

a) méthode de passation des questionnaires

Les questionnaires sont tous anonymes. Les instructions, avant passation, sont toujours les mêmes: les étudiants sont invités à justifier autant que possible leurs réponses, à faire des remarques sur l'énoncé et sur les questions s'ils le jugent nécessaires, comme par exemple de dire: "telle question est ambigüe car..." ou " il manque telle donnée car"...La consigne a été également de demander aux étudiants de laisser la trace de leurs modifications de réponses. Chaque passation a duré environ une demie-heure.

b) population interrogée

636 personnes ont été interrogées, depuis des lycéens de terminale jusqu'à des professeurs de lycée en passant par des étudiants de D.E.U.G. Par ailleurs, la population interrogée provient de différents pays (Brésil, Espagne, France et Portugal).

La population est répartie de la façon suivante:

- 218 étudiants français: lycéens de terminale D, étudiants de 1ère et 2ème année de D.E.U.G. SSM et de licence es-sciences physiques de Paris 7.
- 272 étudiants brésiliens: étudiants de 2ème année de l'Université de Sao Paulo et de 1ère année de l'Université de Vitoria préparant les sections Génie Mécanique ou Construction Civile ou Construction Electrique ou encore Physique.
- 97 espagnols, tous professeurs de lycée dans la région de Valencia, dont 76 en stage de formation continue.
- 49 étudiants portugais (FARO) suivant un enseignement pré-universitaire.

4-3- Troisième étape: traitement et analyse des données

Dans un premier temps, deux questionnaires différents (l'un sur le frottement cinétique, l'autre sur le frottement statique) ont été construits. Une analyse des réponses fournies et de leurs justifications a permis de vérifier et d'étayer certaines hypothèses. Dans un deuxième temps, deux autres questionnaires, chacun sur l'un des deux types de frottement, ont été posés dans le but de tester les hypothèses faites à la fin de la première analyse. L'objectif général n'est pas essentiellement de compter les bonnes réponses, mais de trouver les éléments de la situation physique qui sont à l'origine des réponses et justifications fournies. Les réponses sont classées par catégories et les résultats obtenus révèlent des tendances d'ensemble du raisonnement estudiantin. Rappelons enfin que l'objectif premier est de dégager, toutes choses variant par ailleurs, un certain nombre de constantes, caractéristiques des modes de raisonnement des étudiants. Le traitement et l'analyse des données ne nécessitent pas d'outils statistiques performants, l'essentiel étant dans le choix des situations physiques étudiées et des questions posées. Le modèle

étudiant proposé en fin de course est une description synthétique et simple de ces modes de raisonnement, description qui correspond à des tendances majoritaires et non au raisonnement spécifique d'un étudiant en particulier.

4-4- Quatrième étape: analyse de manuels

Inutile de dire que les manuels jouent un rôle extrêmement important dans l'enseignement, puisque la plupart des cours des enseignants sont construits à l'aide de manuels et que les élèves sont censés travailler sur un manuel donné.

Analyser un manuel peut avoir des objectifs très différents:

- aider un professeur à choisir un manuel pour ses élèves. Ce type d'analyse se centre, actuellement, plus sur la présentation et la forme que le fond.

- s'intéresser aux connaissances et à leur formes d'expression afin de "*chercher la signification que peut prendre cette production pour un novice*" (Legrand, 1988).

- voir si ce qui est traité (et la façon dont c'est traité) permet ou non aux raisonnements dégagés de survivre, voire de se développer.

C'est cette dernière optique qui a été choisie. Elle se différencie des deux autres par le fait que le corpus à analyser est conceptuellement découpé en différentes rubriques définies en fonction des difficultés rencontrées par les étudiants et professeurs lors de l'étude du frottement et de ses lois. De plus, l'analyse porte sur des ouvrages de niveaux divers (du secondaire au supérieur) et s'intéresse aux formes d'expression des contenus ainsi qu'à leur articulation. Par ailleurs, l'étude des raisonnements faites auparavant permet de définir clairement ce que l'on cherche et ce que l'on voudrait que le lecteur d'un manuel apprenne et comprenne.

5- Plan de l'étude

Cette étude comprend quatre parties:

- la première comprend l'étude du frottement solide du point de vue de la physique et du point de vue didactique (chapitre I) et l'étude exploratoire (chapitre II) basée sur des observations faites, lors d'une pratique enseignante, auprès d'étudiants brésiliens de première année d'université, l'analyse du manuel conseillé et utilisé par les étudiants et les professeurs et une mini-enquête auprès d'étudiants du DEA de didactique des sciences expérimentales et techniques (Paris) et d'étudiants de maîtrise es-sciences physiques de l'université des Antilles et de la Guyane.

A la fin du chapitre II, quelques hypothèses ont été dégagées et ont servi de base à la construction de questionnaires plus spécifiques.

- la deuxième partie concerne la description et l'analyse des questionnaires. Les chapitres III et IV décrivent chacun des questionnaires, les uns portant sur le frottement cinétique (questionnaires A et C) et les autres sur le frottement statique (questionnaires B et D): ce qui est l'occasion de tester les différentes hypothèses énoncées à la fin du chapitre II. Une analyse de l'ensemble des résultats se concrétise, au chapitre V, par l'explicitation d'un modèle étudiant descriptif susceptible de rendre compte des tendances générales des raisonnements estudiantins observés lors de l'étude du frottement solide.

- la troisième partie (chapitre VI) comprend l'analyse de trente deux manuels, tous écrits en français, proposés aux élèves de l'enseignement secondaire général, de l'enseignement technique et de l'enseignement supérieur. Cette analyse montre que ces manuels ne permettent pas vraiment une remise en question des raisonnements observés, et parfois même les favorisent.

- la quatrième partie (chapitre VII) développe de façon détaillée un certain nombre de suggestions pédagogiques qui ont pour points de départ les difficultés rencontrées au cours de cette étude et qui devraient participer à déranger les raisonnements estudiantins et à mettre en place des raisonnements et structures plus en harmonie avec la réalité de la physique.

Enfin, au cours de la conclusion, un bilan sera fait qui devrait permettre d'ouvrir un certain nombre de perspectives, tant au plan de la recherche qu'au plan de l'enseignement.

CHAPITRE I
ETAT DE LA QUESTION

Le frottement entre deux surfaces solides non lubrifiées (frottement solide sec) constitue un domaine de la physique très peu exploré par les chercheurs en didactique de la physique. Avant de décrire l'état de la question du point de vue didactique, il nous paraît utile de faire un rapide résumé des principaux concepts et lois physiques qui sont associés à ce phénomène.

1- Frottement solide du point de vue de la physique

1-1- Introduction

Quand un solide reste en contact avec un autre, il est soumis à des actions de contact. Parmi ces interactions, les forces, généralement nommées "forces de frottement", sont régies par des lois de nature assez complexe. En effet, il n'existe pas encore une théorie qui permette d'expliquer complètement les lois de frottement sec entre des solides en contact. Il faut, à ce niveau, souligner le caractère empirique des lois existantes et l'aspect phénoménologique de l'étude du frottement solide qui ne sera abordé ici que du point de vue macroscopique.

L'étude qui suit ne s'intéresse qu'aux phénomènes de frottement solide sec (de glissement et de non glissement) dans des situations physiques de translation pure et de roulement sans glissement, et pour lesquelles les solides en contact sont supposés indéformables. Les frottements de pivotement, de basculement et de roulement seront toujours négligés: les moments des actions de contact habituellement appelés moment de résistance au pivotement, moment de résistance au basculement et moment de résistance au roulement seront supposés nuls.

Des lois du frottement solide étaient déjà connues à l'époque de Léonard de Vinci (1452-1519). Deux siècles avant que Newton n'élabore le concept de force, Léonard de Vinci écrivait: " *Le frottement créé par le même poids offrira la même résistance au tout début du mouvement bien que les surfaces en contact puissent varier..... le frottement sera double si on double le poids*".

En 1699, Amonton redécouvre ces lois et établit expérimentalement que $f_0 = \mu N$ (loi d'Amonton): f_0 est la force de frottement maximale tangentielle aux surfaces de contact, N est la "*pression* " de l'objet sur une surface horizontale et μ est un coefficient sans dimension ne dépendant que des propriétés des surfaces en contact.

Ces observations ont été vérifiées et complétées par Coulomb (1736-1806) qui constate expérimentalement une différence entre les frottements statique et cinétique. Les lois du frottement solide sec que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de "lois de Coulomb", résument ainsi les recherches menées par Coulomb sur des solides en contact dont les surfaces sont sèches, c'est à dire sans aucune adjonction de fluide. Nous allons maintenant, en tenant compte de l'état actuel des connaissances, faire un bref résumé des propriétés et des lois qui régissent les actions de contact entre des solides.

1-2- Les actions de contact

Considérons deux solides quelconques S_1 et S_2 en contact. L'étude de l'ensemble des actions de contact entre ces deux solides permet d'affirmer que:

a- les actions de contact exercées par l'un des solides sur l'autre (par exemple S_1 sur S_2) sont représentées par la résultante des forces de contact que le solide S_1 exerce sur le solide S_2, soit $\vec{R}_{12}$.

b- ces forces de contact sont toujours dirigées vers l'intérieur des solides.

Ceci étant, la loi des actions réciproques (troisième loi de Newton) impose que, si le solide S_1 exerce une force $\vec{R}_{12}$ sur le solide S_2, dirigée vers l'intérieur de S_2, alors le solide S_2 exercera une force $\vec{R}_{21}$ sur le solide S_1 et dirigée vers l'intérieur de S_1. $\vec{R}_{12}$ et $\vec{R}_{21}$ sont portées par la même droite, sont égales en norme mais sont orientées en sens contraire ($\vec{R}_{12} = - \vec{R}_{21}$).

1-3- Les actions de contact et le frottement

a) en présence d'un frottement, la résultante des forces de contact, $\vec{R}$, est toujours inclinée d'un certain angle α par rapport à la normale aux surfaces* en contact. $\vec{N}$ et $\vec{T}$ représentent habituellement les composantes de $\vec{R}$ respectivement sur la normale à la surface de contact et sur le plan tangent à ces surfaces. On a $\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$.

---

*Le terme "surface de contact" sera toujours employé dans un sens général: la surface de contact entre les solides pourra être aussi bien un point de contact, qu'une ligne ou qu'une surface plane.

Pour les deux solides S_1 et S_2 , l'action du solide S_2 sur le solide S_1 est donnée par $\vec{R}_{21} = \vec{N}_{21} + \vec{T}_{21}$ et celle du solide S_1 sur le solide S_2 est donnée par $\vec{R}_{12} = \vec{N}_{12} + \vec{T}_{12}$. Comme $\vec{R}_{12} = -\vec{R}_{21}$, alors $\vec{N}_{12} = -\vec{N}_{21}$ et $\vec{T}_{12} = -\vec{T}_{21}$.

b) quand le frottement est supposé nul, la résultante des actions de contact, $\vec{R}$, se réduit à une seule force normale aux surfaces de contact: $\vec{R} = \vec{N}$ et $\vec{T} = \vec{0}$.

Ainsi, pour les deux solides S_1 et S_2, l'action du solide S_2 sur le solide S_1 est donnée par $\vec{N}_{12}$ et celle du solide S_1 sur le solide S_2 est donnée par $\vec{N}_{21}$ avec $\vec{N}_{12} = -\vec{N}_{21}$.

En résumé, en présence d'un frottement solide sec, les actions de contact entre deux solides sont définies par la résultante des forces de contact que chacune des deux surfaces en contact exerce sur l'autre. Chaque résultante, inclinée d'un certain angle par rapport à la normale aux surfaces de contact, est toujours dirigée vers l'intérieur de chaque solide et admet deux composantes: l'une normale aux surfaces en contact et l'autre tangentielle à ces mêmes surfaces.

1-4- Le frottement

Les composantes tangentielles ($\vec{T}$) des résultantes des forces de contact ($\vec{R}$) que les surfaces des solides en contact exercent les unes sur les autres sont généralement connues sous le nom de "forces de frottement".

Le phénomène du frottement solide sec est ainsi représenté, du point de vue physique, par la résultante des forces de contact qui s'exerce mutuellement sur les surfaces en contact et ses lois seront déterminées par les propriétés des composantes ($\vec{T}$ et $\vec{N}$) de cette résultante.

Cependant l'étude du frottement devra <u>toujours</u> tenir compte des deux points suivants:

a- ce phénomène ne se manifeste que lorsqu'une force extérieure (ou un couple ou encore un moment) est exercée sur le système physique considéré. Ce point peut paraître trivial, mais il faut garder en mémoire que, si ces conditions ne sont pas remplies, on ne peut pas formellement parler de frottement puisque les résultantes des actions de contact sont alors normales à chaque surface en contact et les composantes tangentielles de cette résultante sur chaque surface sont nulles.

b- le phénomène connu sous le nom de "frottement" comprend, en réalité, deux phénomènes distincts: le frottement statique et le frottement cinétique. Dès que la

condition précédente est remplie, le frottement statique se manifeste tant que les surfaces en contact sont en repos relatif du point de vue du non glissement des surfaces les unes par rapport aux autres et le frottement cinétique se manifeste lorsque les surfaces en contact sont en mouvement de glissement relatif non nul. La distinction entre ces deux types de frottement est essentielle car les forces correspondantes ont des propriétés très différentes. A partir de maintenant, nous parlerons explicitement des forces de frottement statique et cinétique.

1-5- Frottement cinétique et frottement statique

1-5-1- Frottement cinétique

Il existe un frottement de glissement cinétique entre deux surfaces en contact, lorsqu'on peut définir au contact (qui peut être un point, une ligne ou une surface plane) une vitesse relative de glissement non nulle pour chaque surface glissant l'une par rapport à l'autre. Considérons à nouveau deux solides S_1 et S_2.

a) vitesse relative de glissement

Soient $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$, les vitesses de S_1 et de S_2 par rapport à un référentiel. Les vitesses relatives de glissement* au contact de S_1 par rapport à S_2 ($\vec{v_{12}}$) et de S_2 par rapport à S_1 ($\vec{v_{21}}$) sont données par:

$$\vec{v_{12}} = \vec{v_1} - \vec{v_2} \qquad \text{et} \qquad \vec{v_{21}} = \vec{v_2} - \vec{v_1}$$

b) les lois du frottement cinétique

Les lois du frottement de glissement cinétique concernent les composantes normale et tangentielle de la réaction que chaque solide exerce sur l'autre, au niveau du contact.

b_1 - les forces de frottement cinétique exercées sur chaque surface en contact ($\vec{T_{12}}$ et $\vec{T_{21}}$) sont toujours opposées aux vitesse relatives de glissement $\vec{v_{12}}$ et $\vec{v_{21}}$. Ainsi, la force de frottement cinétique que le solide S_1 exerce sur le solide S_2 ($\vec{T_{12}}$) s'opposera à la vitesse relative de glissement au contact du solide S_2 par rapport à S_1 ($\vec{v_{21}}$) et vice-versa.

b_2 - les normes des forces de frottement cinétique $\vec{T_c}$ ($\vec{T_{12}}$ et $\vec{T_{21}}$) et de $\vec{N}$ ($\vec{N_{12}}$ et $\vec{N_{21}}$) satisfont à l'égalité:

$$|\vec{T_c}| = \mu_c \, |\vec{N}| \qquad \text{soit}$$

$$|\vec{T_{12}}| = \mu_c \, |\vec{N_{12}}| \text{et} \; |\vec{T_{21}}| = \mu_c \, |\vec{N_{21}}|$$

---

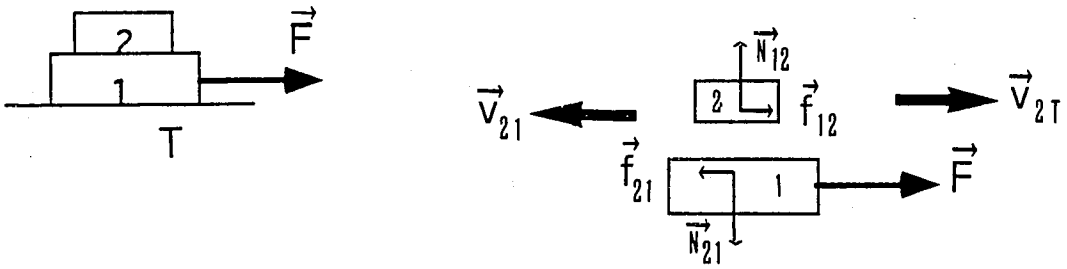
* Désormais, afin de na pas alourdir le texte, nous utiliserons systématiquement: "vitesse ou mouvement relatif de glissement" pour "vitesse ou mouvement relatif de glissement au contact, d'un solide par rapport à l'autre".

Le coefficient μ_C est appelé "coefficient de frottement cinétique" et peut être défini géométriquement par:

$$\mu_C = \frac{|\vec{T}_C|}{|\vec{N}|} = \mathrm{tg}\alpha_C$$

L'angle α_C est appelé angle de frottement cinétique. Le coefficient μ_C et l'angle α_C dépendent de plusieurs facteurs: la nature des matériaux en contact, l'état des surfaces en contact (rugosité), la pression de contact, la température du contact... Ils peuvent dépendre aussi de la vitesse relative de glissement entre les surfaces de contact (dans ce cas, le coefficient μ_C et l'angle α_C sont définis pour une vitesse relative de glissement donnée).

En résumé, la norme et le sens des forces de frottement cinétique sont bien définis dès que l'on connaît chaque vitesse relative de glissement des surfaces les unes par rapport aux autres. Toutefois, une force de frottement, bien qu'opposée à la vitesse relative de glissement, peut être dans le même sens que le mouvement du solide étudié et devenir, pour ce solide, une force motrice. C'est le cas lorsqu'on exerce une force sur un solide, sur lequel un deuxième solide repose. Sur l'exemple suivant deux solides S_1 et S_2 reposent l'un sur l'autre, le solide S_1 reposant sans frottement sur une table horizontale. Une force $\vec{F}$ est exercée sur le solide S_1 et les solides se déplacent l'un par rapport à l'autre. Sur le schéma éclaté suivant, nous avons représenté les seules forces de contact entre les deux solides.



$\vec{v}_{21}$ représente la vitesse de 2 par rapport à 1 et $\vec{v}_{2T}$ représente la vitesse de 2 par rapport à la table.

Nous constatons que la force $\vec{f}_{12}$ est bien la force "motrice" du mouvement de S_2 par rapport à la table. Cette force qui s'oppose au mouvement relatif de S_2 par rapport à S_1, ne s'oppose nullement au mouvement de S_2 par rapport à la table. Ainsi, une force de frottement cinétique, malgré son caractère "passif" (elle ne peut à elle seule produire le mouvement) peut être la responsable d'un mouvement d'un solide et donc avoir un rôle moteur.

1-5-2- Frottement statique

Il existe un frottement statique entre deux surfaces en contact lorsque la vitesse relative de glissement est nulle pour chaque surface en contact. Les surfaces sont ainsi en repos relatif du point de vue du non glissement des surfaces les unes par rapport aux autres, alors qu'une force, un couple ou un moment extérieur au système étudié lui est appliqué.

Considérons à nouveau deux solides S_1 et S_2 en contact.

a) vitesse relative de glissement

En présence d'un frottement statique, la vitesse relative de glissement des solides les uns par rapport aux autres est donc nulle:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_{21} = \vec{0}$$

b) les lois du frottement statique

Ces lois concernent les propriétés des composantes normale et tangentielle de la réaction que chaque solide exerce sur l'autre, au niveau du contact, comme pour le frottement cinétique.

b_1) - les normes des forces de frottement statique $\vec{T}_s$ ($\vec{T}_{12}$ et $\vec{T}_{21}$) et les normes des forces normales $\vec{N}$ ($\vec{N}_{12}$ et $\vec{N}_{21}$) satisfont à l'inégalité $|\vec{T}_s| \leq \mu_s |\vec{N}|$.

Le coefficient μ_s est appelé coefficient de frottement statique; il dépend des mêmes paramètres que ceux du coefficient de frottement cinétique, sauf, bien sur, de la vitesse relative de glissement puisqu'elle est nulle dans ce cas. Par ailleurs, on a toujours $\mu_c < \mu_s$.

L'égalité existe seulement lorsque les forces de frottement statique (T_s) atteignent leur valeur maximum ($T_{s\,max}$). Dans ce cas, les forces de frottement statique exercées sur chaque surface de contact correspondent à la valeur minimum de la force appliquée nécessaire pour déclencher le mouvement: c'est l'état de mouvement de glissement imminent. C'est dans cette situation physique particulière qu'il est possible d'exprimer le coefficient de frottement statique. En effet, on a $\mu_s = \dfrac{|\vec{T}_{smax}|}{|\vec{N}|} = \text{tg}\ \alpha_s$. L'inégalité ($T_s < \mu_s N$) exprime le fait que les normes des forces de frottement statique entre deux surfaces en contact ont des valeurs comprises entre 0 et T_{smax}. Lorsque $\vec{T}_s = \vec{0}$, le frottement statique entre les solides est nul et la réaction des forces de contact ($\vec{R}$) est normale au plan tangent de contact.

En résumé, la norme des forces de frottement statique exercées sur chaque solide en contact peuvent varier entre 0 et $T_{s\,max}$: elles dépendent des autres forces en jeu.

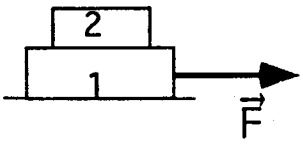
b2) - le sens des forces de frottement statique: ce sens ne peut pas être défini par rapport à une vitesse relative de glissement puisque celle-ci est nulle. Quand un solide a un mouvement non nul (de rotation et/ou de translation) dans un référentiel donné (mouvement que nous appelerons par la suite mouvement donné ou mouvement effectif ou encore mouvement "vrai") avec une vitesse de glissement relative nulle, le sens des forces de frottement statique ne peut pas être déterminé ni défini à partir de la donnée du seul mouvement effectif du solide étudié. Dans ce cas, le sens du mouvement effectif du solide étudié (soit le mouvement de translation du centre de masse du solide, soit le mouvement de rotation autour du centre de masse) ne détermine pas le sens des forces de frottement statique.

On peut simplement affirmer que les forces de frottement statique sont orientées de telle sorte qu'elles s'opposeront toujours à l'éventuelle vitesse relative de glissement des solides les uns par rapport aux autres qu'aurait la surface de contact de chaque solide en contact avec l'autre en absence de frottement. Le sens de ces forces est défini à partir du sens du mouvement de glissement relatif qui se produirait en absence de frottement et non à partir du sens du mouvement effectif qui se produit en présence du frottement statique. Il existe des situations physiques pour lesquelles il est facile de prévoir qualitativement le sens de l'éventuel mouvement de glissement relatif d'un solide par rapport à l'autre et donc d'en déduire le sens des forces de frottement statique; mais ce n'est pas toujours le cas. On est alors obligé d'avoir recours aux équations dynamiques pour déterminer le sens de ces forces.

De façon générale, la seule connaissance des mouvements donnés des solides étudiés dans un référentiel donné ne permet pas de déterminer le sens des forces de frottement statique: de ce point de vue, elles ont un caractère "d'adaptabilité", voire "d'imprévisibilité" parce qu'elles **s'adaptent** et/ou **s'ajustent** en norme et sens aux conditions dynamiques existantes dans les différentes situations physiques étudiées selon les tensions locales présentes, au niveau du contact. Ainsi, pour une situation donnée, les forces de frottement statique ne dépendent que des autres forces en jeu.

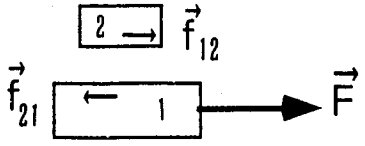
Donnons quelques exemples, à titre d'illustration.

a- Soit deux solides S_1 et S_2 posés l'un sur l'autre, le tout se trouvant sur une table horizontale. Une force $\vec{F}$ est appliquée à S_1 de telle façon que S_2 reste au repos par rapport à S_1.



Cherchons le sens des forces de frottement statique exercées sur chaque solide.
Avec cette situation, il est assez facile de prévoir le sens de ces forces. En effet, en absence de frottement entre les deux solides, le solide S_2 serait au repos par rapport à la table, mais glisserait vers la gauche par rapport à S_1 puisque le mouvement de S_1 par rapport à la table est vers la droite.

Par conséquent, le sens de la force de frottement statique que le bloc (1) exerce sur le bloc (2), ($\vec{f_{12}}$), sera vers la droite puisqu'elle s'opposera à la vitesse relative de glissement de S_2 par rapport à S_1 en absence de frottement. $\vec{f_{21}}$, force de frottement que le bloc (2) exerce sur le bloc (1), sera évidemment opposée à $\vec{f_{12}}$ d'après la loi des actions réciproques, comme le montre le schéma éclaté suivant:



Le frottement statique est souvent étudié pour des solides au repos (exemple un bateau sur des cales). Or, ce frottement n'existe pas seulement lorsque les solides étudiés sont au repos dans un référentiel donné, mais à chaque fois que les zones de contact des deux solides sont au repos du point de vue du non glissement relatif de ces zones les unes par rapport aux autres. Nous venons d'en voir un exemple avec les deux solides S_1 et S_2 posés l'un sur l'autre: S_2 est au repos par rapport à S_1 et en mouvement de translation par rapport à la table.

b- Considérons maintenant une sphère ou un cylindre posés initialement en haut d'un plan incliné et qui roulent sans glisser vers le bas. La force de frottement statique au point de contact (pour lequel la vitesse relative de glissement est nulle) est dirigée tangentiellement vers le haut du plan. En effet, s'il n'y avait pas de frottement entre la sphère (ou le cylindre) et le plan incliné, la sphère glisserait sans rouler vers le bas du plan incliné et, par conséquent, la force de frottement s'opposerait à ce mouvement en étant dirigée vers le haut du plan. Il se trouve que, dans cette situation, le sens de l'éventuel mouvement qui se produirait en absence de frottement coïncidant avec celui du mouvement de translation du centre de masse de la sphère, le sens de la force de frottement statique est opposé à celui du mouvement du centre de masse du solide étudié. Ce résultat ne peut absolument pas être généralisé: en effet, on trouve des situations pour lesquelles le sens de la force de frottement statique est le même que celui du mouvement du centre de masse du solide étudié et, dans ce cas, la force de frottement statique fonctionne comme une force motrice. Le cas des roues porteuses et des roues motrices d'une voiture est très illustratif: la force de frottement statique exercée par le sol sur les roues porteuses est orientée en sens contraire du sens du mouvement (par rapport au sol) de translation du centre de masse de ces roues et donc dans le même sens que celui de leur mouvement de rotation au contact, et c'est le contraire avec les roues motrices.

c- Etudions enfin le cas d'un cylindre (ou d'une sphère) roulant sans glisser sur une table horizontale. Il suffit de faire varier les points d'application de la force $\vec{F}$ constante exercée par l'expérimentateur pour que la force de frottement statique

exercée sur le cylindre change de sens, sans que le sens de rotation soit modifié: la force de frottement statique s'adapte à la situation. Dans le cas d'une sphère de rayon R roulant sans glisser sur une table horizontale, le sens et la norme de la force de frottement statique dépendent de la distance h, par rapport à la table, entre le point d'application de la force $\vec{F}$ exercée par l'expérimentateur et la table. On montre en appliquant la deuxième loi de Newton, le théorème du moment cinétique et en utilisant le fait que la vitesse relative de glissement au contact est nulle (la résolution complète de ce problème se trouve en annexe) que pour des valeurs de $h < \frac{7}{5}R$, la force de frottement statique est de sens opposé à celui du mouvement de translation du centre de masse de la sphère, pour $h > \frac{7}{5}R$, cette force est de même sens que celui du mouvement du centre de masse et que, pour $h = \frac{7}{5}R$, cette force devient nulle sans que pour autant le mouvement de roulement sans glissement ne cesse.Il est impossible de prévoir qualitativement, dans cette situation, quel serait le sens de l'éventuelle vitesse relative de glissement au contact qui existerait en absence de frottement pour <u>chaque valeur de h</u>: cela dépend du moment d'inertie du solide et le recours aux équations dynamiques est indispensable. Il est cependant possible qualitativement de prévoir que le sens des forces de frottement change à partir d'une certaine valeur de h, valeur que seul le calcul, à partir de la connaissance des moments des forces et du moment d'inertie du solide, permettra de déterminer de façon précise. En effet, lorsqu'un solide roule sans glisser, la vitesse du centre de masse est égale à R fois la vitesse angulaire ou encore l'accélération du centre de masse est égale à R fois l'accélération angulaire. Or, cette accélération angulaire dépend du moment des forces et du moment d'inertie du solide étudié.

Pour un solide donné (donc de moment d'inertie donné), lorsque le point d'application de la force que l'on exerce sur lui est modifié, le moment de cette force l'est aussi et peut conduire, en absence de frottement, à une accélération angulaire trop grande ou trop petite pour que le solide puisse rouler sans glisser. La force de frottement s'adapte (ici en freinant ou en accélérant ou même en s'annulant) afin que la résultante des moments des deux forces en jeu permette au solide d'avoir un mouvement de roulement sans glissement. En particulier, lorsque la force $\vec{F}$ est appliquée à la hauteur $h = R$, le moment de cette force par rapport à l'axe qui passe par le centre de masse est nul: s'il n'y avait pas de frottement, la sphère aurait uniquement un mouvement de translation; le roulement sans glissement peut exister grâce à la force de frottement qui a un moment non nul.

Si maintenant, le moment de la force exercée par l'expérimentateur est le même pour deux solides de même forme (par exemple une sphère), de même masse mais dont la masse est répartie différemment (par exemple une sphère pleine et une sphère creuse), on peut se trouver dans la situation où les forces de frottement auront, pour assurer un

mouvement de roulement sans glissement, des sens différents d'un cas à l'autre: ce sera alors le moment d'inertie qui sera déterminant.

Dans tous les cas de roulement sans glissement, la recherche de l'éventuel mouvement de glissement relatif au contact permet de réduire le mouvement combiné de rotation et de translation du solide étudié au seul mouvement de glissement relatif des zones de contact.

1-6- Conclusion

Retenons de ce qui précède les points suivants:

a- les lois qui régissent le frottement solide sec entre des solides en contact sont des lois phénoménologiques

b- Ce phénomène n'est pas régi par une loi unique. Il existe deux phénomènes de frottement: le frottement cinétique (cas du glissement) et le frottement statique (cas du non glissement) qui sont régis par des lois différentes.

c- Il n'existe aucun phénomène de frottement si aucune force (ou couple ou moment) extérieure au système solide - plan de contact ne s'exerce ou n'a pas été exercée sur le solide étudié.

d- les forces de frottement de glissement cinétique sont toujours connues a priori pour des solides, surfaces de contact et mouvements donnés: leur norme, direction et sens sont bien définis par les lois qui régissent ce phénomène. Cette force de frottement s'oppose toujours à la vitesse relative de glissement des surfaces les unes par rapport aux autres. Comme il s'agit de la vitesse **relative** de glissement, cette force peut être, dans certains cas, motrice.

e- les forces de frottement statique ne sont pas connues a priori, pour des solides, surfaces et mouvements donnés, car elles s'adaptent aux conditions physiques de chaque situation donnée, selon les tensions locales, au niveau du contact. Pour ces situations physiques, la vitesse relative de glissement au contact est toujours nulle. La norme de la force de frottement statique varie entre zéro et une valeur maximale, valeur qui correspond à la limite de rupture du non glissement relatif des zones de contact. Le sens de cette force s'oppose à celui de l'éventuel mouvement relatif des zones de contact des solides les unes par rapport aux autres qui se produirait en absence de frottement. Les forces de frottement statique peuvent ainsi avoir n'importe quel sens et n'importe quelle norme, cela dépend des autres forces en jeu.

f- les actions de contact, qui s'exercent sur des solides en contact, décrites par les composantes normale et tangentielle obéissent, comme toutes les forces, aux lois de Newton.

2- Frottement solide du point de vue de la didactique

A notre connaissance, il n'existe pas d'études spécifiques sur les forces de frottement solide. Toutefois, quelques études, non centrées sur les frottements, mentionnent certaines difficultés des élèves sur ce phénomène. On rencontre également quelques articles écrits par des enseignants-chercheurs de physique qui décrivent des expériences de physique, expériences dont les résultats sur les propriétés des forces de frottement ont surpris les étudiants, nous y reviendrons.

2-1- Quelques résultats sur les modes de raisonnement des étudiants en mécanique

Bien que nos recherches bibliographiques indiquent qu'il n'existe aucune recherche en didactique de la physique spécifiquement consacrée à l'étude du frottement solide, on peut remarquer que, pour aborder cette partie de la physique, il faut maîtriser le concept de force, connaître et maîtriser les lois de Newton ainsi que les notions de mouvements relatifs. Il existe, en revanche, sur ces points, des travaux sur les raisonnements des étudiants qui peuvent déjà nous indiquer où nous risquons de trouver des difficultés. En effet, ces travaux ont mis en évidence:

a)- des difficultés liées aux mouvements relatifs.

A cause de la notion de vitesse relative de glissement, il est important de connaître le mouvement relatif d'un solide par rapport à l'autre pour déterminer le sens de la force de frottement. Or, Edith SALTIEL (1978) a montré combien il était difficile, pour les étudiants, de raisonner en termes de référentiels et de définir des grandeurs physiques dans des référentiels. Pour les étudiants, les mouvements d'objets sont définis de façon intrinsèque à partir de leurs causes dynamiques. Les situations physiques pour lesquelles il est nécessaire de connaître le mouvement relatif d'un objet par rapport à un autre sont des situations reconnues être difficiles pour et par les étudiants. Sur ce sujet, E.SALTIEL (1992) explique: " *on constate que la vitesse d'un objet est tout d'abord celle que lui communique son "moteur", ce dernier pouvant être les muscles d'un personnage, le moteur d'un mobile, la gravité... La vitesse d'un objet est définie de façon intrinsèque (absolue diront certains) à partir de la cause dynamique qui lui donne naissance. L'étudiant fait ainsi une différence entre repos et mouvement, mouvements vrais, réels et mouvements apparents. C'est grâce à l'existence et l'identification d'une cause dynamique qu'un mouvement est reconnu être vrai.* "

Ou encore: " *L'étudiant ne se pose quasiment jamais la question du référentiel, puisqu'il n'en voit pas la nécessité..... Les travaux de notre équipe indiquent que les vitesses aussi bien que les forces existent en elles-mêmes, indépendamment des référentiels, et servent à expliquer le mouvement.....Le mouvement (propre) et l'immobilité sont définis*

intrinsèquement et non comme déplacement par rapport à ..." (SALTIEL; MALGRANGE, 1979)

Tout ceci signifie que les étudiants ne considèreront qu'un seul mouvement pour un solide donné, le mouvement "vrai". Un mouvement relatif pourra éventuellement être mentionné; mais, pour les étudiants, seul le mouvement "vrai" compte.

b)- des difficultés liées à la loi des actions réciproques: application de la loi et localisation des forces.

Ici, la prise en compte de cette loi est importante puisque, étant deux solides en contact, si le solide 2 exerce une force de frottement sur le solide 1, le solide 1 exerce sur le solide 2 une force de frottement reliée à la première par la loi des actions réciproques. Laurence VIENNOT a montré combien cette loi était mal comprise et appliquée: par exemple, pour les étudiants, la réaction pouvait, dans des situations hors d'équilibre, être considérée différente de l'action. Jacqueline MENIGAUX et Laurence VIENNOT ont également montré que les étudiants ont beaucoup de difficultés à localiser sur le bon objet une force de contact. En effet, en demandant à des élèves de dessiner toutes les forces d'une interaction de contact dans différentes situations physiques (exemples: un éléphant poussant un arbre, une personne poussant une voiture, une voiture tirée par un tracteur, un archer tirant sur son arc...). Jacqueline MENIGAUX (1986) déclare:

" on observe donc qu'aussi bien pour les forces de poussée que pour les forces de traction un pourcentage important des élèves ... schématise les forces d'une interaction en inversant les objets d'application des forces. Nous pensons que cette tendance révèle une idée profondément ancrée dans l'esprit des élèves: les objets possèdent une force".

ou un autre aspect du même problème:

"..... spontanément, les élèves caractérisent les objets d'une interaction en objet "actif" et objet "passif".... Pour les élèves, l'objet "actif" a une action sur l'objet "passif", c'est l'action de la loi de l'action et de la réaction (loi des actions réciproques). Par contre, la réaction au sens de cette loi, qui est l'action de l'objet "passif" sur l'objet "actif" leur est moins évidente."

- la question de la localisation des forces est aussi évoquée, dans un cours de mécanique pour débutants, par Laurence VIENNOT (1986)

"...plus profondément peut-être, il y a confusion entre l'idée du bilan des forces exercées sur un même objet, effectué pour comprendre ou prévoir le mouvement de cet objet (loi fondamentale) et l'idée de comparer (loi des actions réciproques) des forces s'exerçant sur des objets différents.

Une telle confusion favorise, et ou est entretenue par, le fait que les objets sur lesquels s'appliquent les forces ne sont pas clairement localisées; un point de contact entre objets appartient aussi bien à l'un qu'à l'autre: y "attacher" une force ne suffit pas à spécifier sur quel objet la force s'applique."

Jacqueline MENIGAUX (1986) arrive aussi aux conclusions suivantes, pour une majorité d'élèves interrogés:

"..... *des élèves questionnés schématisent les forces de poussée dans la zone d'interaction. Cette tendance..... persiste donc après l'enseignement.*"

Laurence VIENNOT (1979) explique encore: "... *la force exercée sur l'objet et la force de cet objet se fondent en une seule et même cause de mouvement; de ce fait, la question "qu'est-ce qui agit sur quoi?" est souvent évacuée et les points d'application des forces allègrement déplacés.*"

c)- des difficultés liées au fait que les étudiants raisonnent en terme de **capital de mouvement** qui est **attribué à** l'objet.

Les travaux développés dans des domaines différents par E.SALTIEL (changement de référentiels; 1979), L.VIENNOT (dynamique élémentaire; 1978), S.ROZIER (raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire; 1988) et L.MAURINES (propagation de signaux mécaniques; 1986) ont amené à supposer que, comme le rappelle E.SALTIEL (1993):

" *Le mouvement d'un objet est expliqué à l'aide d'une notion hybride qui englobe force, vitesse, énergie que nous avons appelé capital de mouvement. ce capital est attribué à l'objet. Il peut être stocké dans l'objet, s'user...*"

ou encore

" *dans les exemples de dynamique, l'indifférenciation est due au fait que les gens raisonnent en termes de force de l'objet (que nous traduisons par capital attribué à l'objet) et non en terme de force exercée par... sur l'objet.*"

A partir du travail de L.MAURINES, L.VIENNOT (1989) explique que les étudiants montrent "...*une forte tendance à faire un traitement dynamique du signal (une "bosse" sur une corde) analogue à celui d'un objet matériel. Le signal stockerait en quelque sorte la cause initiale- la secousse de l'expérimentateur...*"

Il est suggéré que les phénomènes physiques en cause dans ces travaux sont une propriété intrinsèque de l'objet ou qu'ils sont traités comme un objet.

L'ensemble de ces travaux permet de prévoir un certain nombre de difficultés que les étudiants peuvent rencontrer lors de l'étude du frottement:

a- dès que plusieurs solides sont en jeu et que ces solides se déplacent les uns par rapport aux autres, les étudiants risquent d'avoir des problèmes avec la loi des actions réciproques et la localisation des forces de contact (c'est à dire savoir sur quels solides elles s'exercent), avec les vitesses relatives de glissement et donc des mouvements relatifs.

b-les étudiants risquent de considérer que le phénomène de frottement est une propriété intrinsèque des solides en contact.

2-2- Résultats de recherche en didactique de la physique faisant intervenir indirectement le frottement.

Un certain nombre de difficultés ont été repérées par Andrée DUMAS-CARRE (1987) et Monique GOFFARD (1990) à propos de l'apprentissage de diagrammes objets - interactions. Monique GOFFARD les définit comme étant:" *une représentation des objets et des interactions existant entre ces deux objets. C'est une schématisation,....., qui, en mécanique du point, est une représentation des objets par des points auxquels sont associées un certain nombre de grandeurs physiques. Dans le diagramme objets-interactions, on ne s'intéresse plus à la forme de l'objet, seul est retenu son caractère déformable ou non et ses relations avec son environnement.* "

Etant donné que les notions d'objets et d'interactions " *ne sont pas toujours acquises .....et nécessitent un apprentissage*", l'auteur explique qu'un tel apprentissage permet:

- "*...de mieux identifier interaction à distance et interaction de contact.....*

- *d'éviter la confusion entre interaction à distance et interaction par transmission: pour certains élèves, lorsque trois objets sont en contact,* (et l'un sur l'autre) *le premier objet est en interaction à distance avec le troisième, par l'intermédiaire du second.*

- *de faire la différence entre objets et phénomènes: les frottements, les chocs, poussée ou attraction terrestre sont, pour certains élèves, des objets.* "

Ces résultats suggèrent, là encore, quelques difficultés, pour les élèves:

a- il n' y aurait pas ou peu de différence entre objets et frottement, ce qui semble vouloir dire à la lumière des recherches citées dans la section précédente que le frottement peut être conçu comme étant une propriété intrinsèque des solides en contact.

b- le contact entre différents objets est la cause de l'existence d'interaction par transmission. Si tel est le cas, quel serait alors le rôle du frottement dans cette "transmission"?

2-3- Quelques reflexions sur l'enseignement des frottements:

On rencontre dans la littérature des articles qui, sans être des compte-rendus de recherche, sont l'aboutissement d'une reflexion sur l'enseignement d'un point précis de physique. Il existe quelques articles de ce type sur les frottements.

Laurence VIENNOT (1986), à propos du sens de la force de frottement, écrit dans un cours de mécanique pour débutants:

"*on dit souvent que les forces de frottement s'opposent toujours au déplacement. C'est faux. Ces forces peuvent aussi être dans le même sens que le déplacement, en effectuant un travail nul (cas du sol agissant sur une voiture) ou même positif (accélération d'un objet par frottement).* "

SALAZAR, SANCHEZ-LAVEGA et ARRIANDAGA (1990) se posent le même type de question. Le titre de leur article est significatif " *Is the frictional force always opposed to the motion?*" A l'aide de deux exemples, les auteurs montrent que, dans certains cas, la force de frottement cinétique ou statique peut agir dans le même sens que celui du mouvement du centre de masse du solide considéré et lui imprimer l'accélération nécessaire à son déplacement. Le deuxième exemple montre que, pour un solide roulant sans glisser et toujours en contact avec la même surface, la force de frottement statique peut changer de sens (soit dans le sens du mouvement, soit en sens contraire) en changeant le point d'application de la force (supposée constante) de poussée exercée sur le solide. Les auteurs montrent également qu'en changeant le point d'application de cette force (supposée constante), la norme de la force de frottement varie et peut devenir nulle. Ils écrivent:

"*.... The apparent paradox can be explained if we bear in mind that the frictional force is opposite to the direction of the possible velocity of the contact point relative to the surface and not to the velocity of the center of mass.*"

ou encore, en prenant le point de vue de l'étudiant ou de l'enseignant:

" *students of a general physics course have to face a seemingly paradoxical result. Under certains conditions, dynamics equations predict that the frictional force and the object's motion have the same direction. So, what about the statement that says frictional force is always opposed to the motion?*" . Plus loin, les auteurs écrivent:

" *consequently we would like to conclude that when introducing students to this problem, it should be emphasised that the frictional force acting on a body is opposite to the velocity (or the possible velocity) of its contact point, line or surface relative to the surface it is in contact with.*"

D. SHAW (1979) montre aussi, à l'aide d'un montage expérimental (cf. article en annexe B) comprenant un cylindre roulant sans glisser sur un plan horizontal que la force de frottement statique peut s'annuler pour certaines valeurs du moment de la force appliquée au cylindre, tout en maintenant la force exercée constante et tout en gardant les mêmes surfaces de contact. L'auteur trouve encore que la force de frottement statique peut être de même sens ou en sens contraire de celui du mouvement du cylindre, mouvement qui garde toujours la même direction et le même sens. L'auteur écrit à ce propos:

" *students discover that the frictional force may be in the opposite or the same direction as the motion of the mass center of the rolling object. For a certain value of the applied torque the magnitude of the frictional force is zero regardless of the nature of the flat surface. Since most students find this results quite surprising...*"

exercées sur le solide quand ce dernier est encore au repos sur le plan incliné, l'auteur écrit: "*The frictional force may be directed either down the plane or up the plane, depending upon the magnitudes of the other forces.*"

GENSTEN, SOODAK et TIENSTEN (1992) étudient le déplacement, sur des surfaces horizontales, de balles initialement au repos ou en rotation. Les auteurs montrent que la force de frottement peut être la seule responsable du mouvement: "*The downward gravity force and upward normal force are equal and opposite and along the same line of action, and thus exert no net force or torque. The unbalanced force is the frictional force f exerted by the surface on the bottom point of the ball, the only point of the ball in contact of the surface.*"
Plus loin, ils écrivent encore: *The friction force is not known* ***ab initio....***"

L'ensemble de ces travaux suggère que les étudiants considèreront les forces de frottement comme des forces qui s'opposent toujours au mouvement des solides en jeu (sans référence à leur mouvement relatif) et qu'ils leur sera difficle de reconnaître qu'une force de frottement puisse être motrice. D'autre part, quelques uns de ces travaux laissent penser que les étudiants risquent de ne pas reconnaître le caractère "imprévisible" des forces de frottement statique, voulant leur donner un sens bien défini, comme pour les forces de frottement cinétique.

3- Conclusion

L'objectif de ce panorama a été de faire le tour de la question sur les frottements solides à un niveau élémentaire, ce qui a permis, en particulier, de montrer que certains résultats d'expériences surprennent les étudiants (et peut-être même certains enseignants). Ces expériences et les différents travaux de recherche en didactique de la physique laissent penser que les étudiants seront confrontés à des difficultés lors de l'étude des frottements solides. L'objectif de ce travail étant de dégager les modes de raisonnement utilisés par les étudiants, cette première analyse permet de faire des hypothèses sur d'éventuels modes de raisonnement. La phase exploratoire va permettre d'affiner ces hypothèses.

CHAPITRE II
PHASE EXPLORATOIRE

Introduction

Nous avons mentionné dans l'introduction l'existence de cette phase exploratoire. Il ne s'agit pas ici de la décrire en détail, mais d'en dégager les éléments essentiels. Cette phase comprend trois périodes de nature différente: la première correspond aux observations réalisées au cours de trois années d'enseignement de physique élémentaire en première année d'Université au Brésil; la seconde correspond au passage d'un questionnaire préliminaire sur le frottement cinétique à un très petit nombre de personnes et la troisième explicite les hypothèses de travail.

1- Observation en classe

Il s'agit d'une observation en classe très empirique puisque le chercheur et l'enseignant étaient la même personne qui, de plus, ne disposait, d'aucun moyen d'enregistrement.

Ces observations ont eu lieu au Brésil, en première année d'Université et durant trois années consécutives (1986 à 1988), à l'occasion d'un enseignement de physique élémentaire. Chaque année, quatre groupes différents, comprenant chacun 30 à 35 étudiants par groupe, ont reçu un enseignement de physique et, en particulier, un enseignement sur le frottement solide de glissement et de non glissement. Un tiers de ces étudiants venait de l'enseignement technique, les autres de l'enseignement général. Bien que ces étudiants aient choisi des options différentes (Génie mécanique, Génie électrique, Génie de construction et Physicien), le programme de physique était le même pour tous.

Durant ces trois années, nous avons rencontré, chaque année, les mêmes difficultés de compréhension chez un grand nombre d'étudiants (qu'ils appartiennent au groupe génie électrique, génie de construction, génie mécanique ou physique), aussi bien durant le cours que pendant les séances d'exercices.

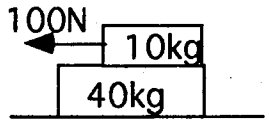
Les premières difficultés apparaissent lorsque l'enseignant introduit le fait que les forces de frottement cinétique s'opposent au mouvement relatif des objets et que, dans certaines situations physiques, cette propriété permet d'avoir une force de frottement cinétique qui s'exerce sur un objet quelconque et qui est de même sens que celui du

mouvement de l'objet dans le référentiel d'étude. Ainsi, quand on essaie d'expliquer aux étudiants que la force de frottement cinétique "ne s'oppose pas toujours au mouvement" de l'objet étudié, on rencontre des refus. En effet, certains déclarent que: "*non, le frottement s'oppose toujours au mouvement*" ou "*c'est impossible puisque l'objet va s'arrêter*" ou "*non, le frottement est toujours dissipatif, donc il est de sens contraire à celui du mouvement*" ou " *si les frottements peuvent avoir le même sens que le mouvement, ils seront donc responsables de ce mouvement et cela ne peut être vrai*" ou " *la loi des frottements dit qu'ils s'opposent toujours* " ou"*d'ailleurs elle est toujours négative*" .

Dans le cas du frottement statique, les étudiants refusent aussi de croire que, par exemple, nous arrivons à avancer en marchant grâce aux frottements et que la résultante des forces de frottement qui s'exerce sur nos pieds est de même sens que celui du mouvement de la marche. Certains déclarent que: " *pas du tout, nous marchons à cause de la force des jambes, donc la force de frottement est opposée au mouvement*" ou " *oui, il faut du frottement pour ne pas tomber; mais la force de frottement ne peut pas être dans le même sens...*". De ces cours, retenons que les étudiants sont persuadés que "*le frottement en général s'oppose toujours au mouvement*" , "*que la force de frottement ne peut pas avoir le même sens que celui du mouvement* " et la preuve, pour eux, est que"*le frottement est dissipateur d'énergie*". De façon générale, le frottement (cinétique et statique) semble être compris, par les étudiants, comme un phénomène qui possède la propriété de "toujours s'opposer au mouvement", sans bien savoir de quel mouvement il s'agit.

Durant les séances d'exercices, des difficultés sont apparues à l'occasion de deux problèmes particuliers, extraits du manuel de Mécanique, physique 1, Resnick et Halliday (1979), utilisé par les enseignants et les étudiants : .

Premier problème (frottement cinétique):

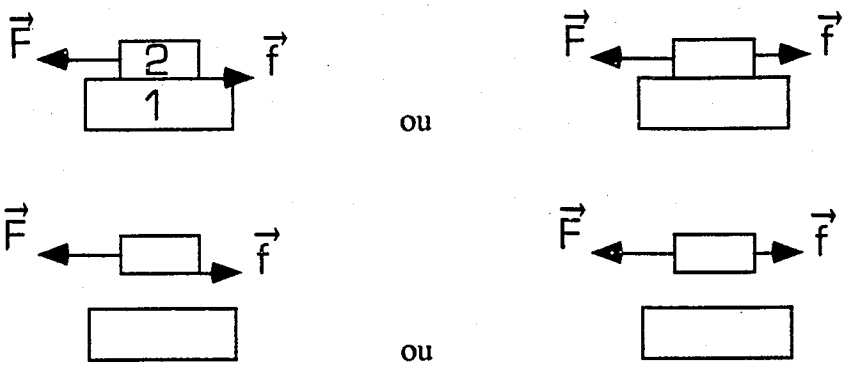


frottement nul

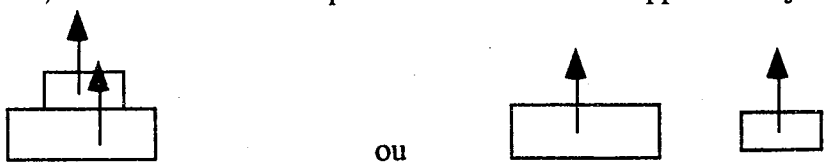
"Une dalle de 40,0 kg repose sur un plancher parfaitement lisse. On dépose sur cette dalle un bloc de 10 Kg (cf. figure). Le coefficient de frottement statique vaut 0,60 et le coefficient cinétique 0,40. Si une force horizontale de 100N est appliquée sur le bloc de 10 kg, calculez les accélérations (a) du bloc, (b) de la dalle".

Avec ce problème, nous demandions toujours aux étudiants de représenter toutes les forces exercées sur la dalle et le bloc. Nous avons observé, dans les réponses, des schémas:

- avec une seule force horizontale de frottement $\vec{f}$ opposée à la force $\vec{F}$ et localisée, de façon majoritaire, à l'interface; certains la localisant sur le bloc du dessus, comme indiqué sur la figure:



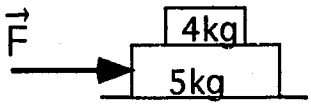
- avec une seule composante normale par bloc: la dalle exerçait une force verticale sur le bloc; mais la force exercée par le bloc sur la dalle n'apparaissait jamais.



La force de frottement était calculée sans grande difficulté à l'aide de la formule $f_c = \mu_c N = \mu_c\, m_2\, g$. Autant l'accélération du bloc était trouvée par beaucoup ($a_2 = \frac{F-f}{m_2}$), autant celle de la dalle pouvait avoir des valeurs qui variaient selon les étudiants: identique à a_2 ou bien $\frac{F-f}{m_1}$ ou $\frac{F-f}{m_1 + m_2}$ ou encore $\frac{F}{m_1 + m_2}$. Cette disparité dans les réponses nous a beaucoup étonnés: pourquoi une telle variété de réponses uniquement pour l'accélération de la dalle et pourquoi la force $\vec{F}$ apparaît-elle toujours dans les calculs?

Deuxième problème (frottement statique):

"On dépose un bloc de 4,0 kg sur un bloc de 5,0kg. Une force horizontale de 12N est nécessaire pour faire bouger le bloc du dessus par rapport à celui du dessous. On place maintenant les deux blocs sur une surface horizontale sans frottement. Trouvez (a) la force maximum pouvant s'exercer sur le bloc inférieur pour que les deux blocs se déplacent ensemble, (b) l'accélération des deux blocs".



Comme précédemment, il était également demandé aux étudiants de représenter, sur le schéma, les forces exercées sur les blocs. Là encore, nous trouvions très souvent une seule force horizontale de frottement opposée à la force $\vec{F}$ et localisée soit à l'interface soit sur le bloc supérieur et une seule force de contact verticale orientée toujours du dessous vers le dessus. Nous retrouvions le même type de variété de réponses pour les accélérations qu'avec l'exercice précédent. Notons enfin que les quelques étudiants qui ont fourni des schémas corrects pour les forces de frottement, ont, pour calculer la force de frottement exercée sur le bloc 1, tenu compte de la composante normale qu'exerçait le plancher sur le bloc 1 et non celle qu'exerçait le bloc 2.

Il ressort de ce rapide bilan que nous avons eu beaucoup de mal à faire accepter par les étudiants les points suivants:

- les deux blocs ne se déplacent pas forcément toujours ensemble dans le cas du premier problème.

- d'après la loi des actions réciproques, tout frottement se modélise par deux forces s'exerçant sur chacun des deux corps en contact, que l'un soit au-dessus de l'autre n'ayant aucune importance.

- la seule force exercée sur le bloc du dessous (premier exemple) ou du dessus (deuxième exemple) est la force de frottement. A l'aide de la deuxième loi de Newton, on peut obtenir l'accélération de chacun de ces blocs par rapport à la table, accélération qui a le même sens que la force de frottement.

- dans le deuxième exercice, la force de frottement sur le bloc du dessous était calculée à l'aide de la loi de Coulomb $f_s = \mu_s N$ où N est la force normale entre les surfaces en contact et non la force normale entre le plancher et ce bloc puisque le frottement entre ce bloc et le plancher était nul.

- les étudiants ont traité de la même façon les deux exercices en supposant que la force de frottement devait s'opposer au "mouvement", alors que les deux exercices traitent de frottements différents (cinétique pour le premier exercice et statique pour le second) et que, dans le deuxième exercice, le bloc du dessus était au repos par rapport à celui du dessous.

Nous avons ensuite "regardé" le manuel de référence afin d'essayer de voir si les parties cours et exercices permettaient de résoudre ces difficultés. Nous avons relevé quelques points troublants:

- la première partie de ce livre traite des principaux concepts et lois de la dynamique de translation dans un monde sans frottement. La deuxième partie est introduite de la façon suivante:

" *Au chapitre 5, nous avons traité la dynamique des corps sous l'action de forces constantes en grandeur et en direction. Ces forces étaient exercées par la Terre ou par des cordes tendues, c'est à dire par des forces gravitationnelles ou élastiques. Dans ce chapitre nous abordons une* ***nouvelle*** *force: le frottement*" . La question qui vient de

suite à l'esprit est la suivante: en quoi, cette nouvelle force est-elle nouvelle? où se situe la nouveauté? Les lois étudiées au chapitre précédent restent-elle valables?...La nouveauté, sept lignes plus loin, est déduite d'un exemple donné:" *Si nous lançons un bloc de masse m à une vitesse initiale v_0 sur un plan horizontal, il perd graduellement cette vitesse et s'arrête. On doit conclure qu'il a subi une accélération moyenne $\vec{a}$ qui s'opposait au mouvement."(page 95)*. Ce qui laisse penser que la nouveauté est dans le fait que cette force s'oppose au mouvement. Mais ceci concerne le point suivant.

- Page 95, il est écrit:" *De fait, chaque fois que deux surfaces glissent l'une par rapport à l'autre, des forces de frottement s'exerçent sur chacune d'entre elles et s'opposent à leur mouvement relatif; les forces de frottement ne favorisent donc pas le mouvement.*". Les deux premières lignes de ce texte sont correctes et la dernière partie de la phrase " *les forces de frottement ne favorisent donc pas le mouvement*" est pour le moins ambigüe, car le terme "relatif" est absent. C'est sans doute ce type de phrase qui permet de faire croire aux étudiants qu'une force de frottement ne peut pas être dans le même sens que le mouvement de l'objet sur lequel elle s'exerce. Or cette phrase vient après l'exemple déjà cité: une masse "*a subi une accélération moyenne $\vec{a}$ qui s'opposait à son mouvement.*" Ce cours insiste tellement peu sur cette notion de mouvement relatif qu'il est facile de faire l'amalgame entre mouvement relatif et mouvement "vrai" (ou effectif) d'un des corps. Comment ne pas en déduire que toute force de frottement freine et s'oppose au "mouvement" donné de l'objet concerné? On retrouve cette idée à la page suivante quand les auteurs donnent des exemples de frottement:" *c'est lui qui ralentit les arbres des moteurs. C'est lui encore qui gaspille plus de 20% de la puissance d'un moteur d'automobile. Les frottements entraînent l'usure et le blocage des pièces mobiles, en plus d'obliger ingénieurs et mécaniciens à tout mettre en oeuvre pour les contrer. D'autre part, sans frottement, la marche serait impossible; nous ne pourrions tenir un crayon; le transport sur roue n'existerait pas.*" Les deux derniers exemples cités sont intéressants à condition de les analyser et de montrer que pour la marche et le transport sur roue, la force de frottement (dans ce cas statique) est de même sens que le mouvement effectif de l'objet sur lequel elle est appliquée, ce qui est absent du texte.

Autre constat: au début, les auteurs parlent en termes de forces de frottement au pluriel "*des forces de frottement s'exerçent sur chacune d'entre elles* ", ce qui laisse supposer qu'il existe une force de frottement sur chaque solide et que les auteurs ont appliqué la loi des actions réciproques; mais, par la suite, nous ne retrouvons plus cela car les schémas ne comportent qu'une seule force: les auteurs parlent en termes de force de frottement au singulier et il n'existe aucun exemple montrant que, quand deux solides sont en contact, une force de frottement s'exercera sur chacun des deux solides.

Par ailleurs, les forces en jeu dans des situations de frottement ne sont pas toujours distinguées, au niveau du langage, du phénomène de frottement: "*Il faut en*

conclure qu'une force agissant le long des surfaces en contact vient équilibrer la force appliquée: c'est un frottement" (p. 96) ou *"La force minimum nécessaire au déclenchement du mouvement correspondra au frottement.."*

Certains exercices proposés nécessitent, eux, d'avoir compris que les forces de frottement cinétique s'opposent au mouvement relatif des surfaces en contact et étudient des situations où une force de frottement est dans le même sens que celui du mouvement du mobile sur lequel elle s'exerce. Il y a une très grande distance entre ce qui est écrit dans le cours et ce qui est demandé dans cette partie exercices, ce qui peut correspondre à un choix pédagogique délibéré.

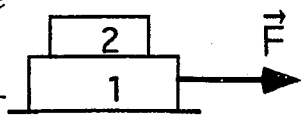
Après cette expérience professionnelle, un certain nombre de questions viennent à l'esprit:

- comment les étudiants déterminent-ils le sens des forces de frottement pour chaque type de frottement, cinétique et statique? Ces forces s'opposent-elles toujours au mouvement? si oui, à quel mouvement: s'agit-il, pour eux, du mouvement relatif d'un solide par rapport à l'autre ou du mouvement de l'un des solides en contact?
- pourquoi est-il si compliqué de considérer les forces de frottement entre deux surfaces en contact comme une paire de forces, c'est à dire une force qu'une surface exerce sur l'autre et réciproquement.
- pourquoi la composante normale retenue pour calculer la force de frottement entre deux corps A et B en contact est-elle parfois la force qui s'exerce entre A et un autre corps?
- pourquoi est-il si difficile d'appliquer le principe fondamental de la dynamique lorsque la résultante des forces (dans la direction du mouvement donné) qui s'exercent sur un corps est la force de frottement?

2- Questionnaire exploratoire (frottement cinétique):

Nous avons eu l'opportunité de passer le questionnaire suivant à 7 étudiants du DEA de didactique des sciences physiques de Paris et à 5 étudiants de maîtrise es sciences physiques de l'Université des Antilles et de la Guyane.
L'énoncé est le suivant:

"Un bloc de masse m_1 repose sans frottement sur une table horizontale. Un bloc de masse m_2 repose sur le premier bloc: il existe cette fois un frottement entre les deux blocs. Une force $\vec{F}$, constante, est appliquée au bloc m_1 On constate que le bloc m_1 se déplace par rapport à m_2



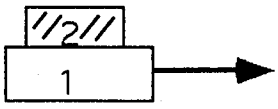
Questions: 1- la force de frottement exercée sur m_1 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de m_1 ? Justifiez votre réponse.

2- La force de frottement exercée sur m_2 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de m_2 ? Justifiez votre réponse.

Nous voulions savoir comment des adultes (au moins bac + 4) dont certains enseignent dans le secondaire, répondraient à un tel questionnaire, pensant que nous aurions du trouver beaucoup de forces de frottement exercées sur le bloc supérieur (2) de même sens que la force $\vec{F}$. Or les résultats sont les suivants:

Tableau 1

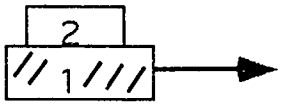
Sens de la force de frottement s'exercant sur le bloc (2)

	DEA N= 7	Guad. N= 5	Total N= 12
Force de frottement s'oppose au mouvement	6	4	10 (83%)
Force de frottement de même sens que le mouvement	1	-	1 (8,5%)
Pas de réponse	-	1	1 (8,5%)

10 étudiants sur 12 disent que la force de frottement s'oppose au mouvement, alors que 4 dessinent une seule force de frottement située à l'interface, 4 ne dessinent rien, et les quatre derniers dessinent deux forces. Aucune réponse ne mentionne que l'énoncé était ambigü et ne précise par rapport à quel mouvement la force de frottement s'oppose. Les réponses à la première question sont regroupées dans le tableau suivant:

Tableau 2

Sens de la force de frottement s'exercant sur le bloc (1)

	DEA	Guadeloupe.	Total N= 12
Pas d'action de la force de frottement sur (1)	3	3	6 (50%)
force de frottement sur (1) s'oppose au mouvement	3	2	5 (41,5%)
Pas de réponse	1	-	1 (8,5%)

Bien que l'énoncé précise que "*le bloc m_1 se déplace par rapport à m_2* ", on trouve quelques justifications qui laissent penser que, pour ces étudiants, les deux blocs se déplacent ensemble:

"*la force de frottement sur m_1 ne s'oppose pas au mouvement de m_1 . Elle s'oppose au mouvement de l'ensemble.*"

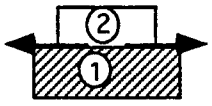
" *La force de frottement entre la table et le bloc est négligeable donc elle ne peut s'opposer au mouvement des deux blocs. Les deux blocs forment un seul système qui se déplace, les forces de frottement à l'intérieur de ce système n'influent en rien sur le mouvement.*"

On trouve également des justifications qui expriment que la force de frottement n'a pas d'effet sur le bloc (1):

"*L'ensemble (m_1 m_2) ne peut pas être freiné par la force de frottement entre m_1 et m_2 . Seulement une force de frottement entre m_1 et le sol jouerait ce rôle.*"

"*En fait, il n'y a pas de force de frottement sur le bloc (1), sinon le frottement entre la table et ce bloc qui, par hypothèse est négligeable.*"

Par ailleurs, le fait de dessiner sur les schémas une paire de forces de frottement peut ne pas correspondre à une bonne compréhension de la loi des actions réciproques, comme le montre l'exemple suivant:



" *La force de frottement sur (1) ne s'oppose pas au mouvement car le frottement sur (1) est une force de (2) sur (1). . Cette force concerne l'interface (2) (1). En fait, il n'existe pas de force de frottement sur le bloc (1).*"

Ces quelques justifications appellent d'autres questions auxquelles nous nous efforcerons de répondre par la suite:

- il semble que la force de frottement ne soit pas reconnue exister sur le bloc (1), c'est à dire le bloc inférieur sur lequel est exercée la force $\vec{F}$. Est-ce que parce qu'il y a la force $\vec{F}$? Si on applique cette force sur le bloc supérieur, trouvera-t-on le même genre de réponses?

- les étudiants considèrent-ils vraiment que les deux blocs vont ensemble? En effet, ceux qui se réfèrent à l'ensemble des deux blocs répondent (à la deuxième question) sans état d'âme que la force de frottement s'oppose au mouvement de (2) sans référence au mouvement relatif entre les blocs. Alors pourquoi changent-ils de système en cours de route?

3- Conclusion et hypothèses de travail

Les résultats des différents travaux de recherche ou d'enseignement exposés au chapitre I et les difficultés repérées lors de cette phase exploratoire ont permis de faire un premier inventaire des points sur lesquels nous avons souhaité avoir des éléments de réponses.

Ainsi, les questions qui se sont posées à nous sont les suivantes.

Pour les étudiants:

- La force de frottement, que le frottement soit cinétique ou statique, s'oppose-t-elle ou non toujours au mouvement donné ("vrai") du solide sur lequel elle s'exerce?

- Le sens de la force de frottement statique, lorsque le solide étudié a un mouvement non nul dans un référentiel donné, est-il déterminé à partir du sens du mouvement donné du solide étudié? et en particulier le sens de cette force peut-il changer, sans que le sens du mouvement effectif de ce solide ne change?

- La loi des actions réciproques est-elle appliquée, lorsque deux solides sont en contact? Si non, les forces de contact horizontale et verticale considérées agissent-elles plutôt sur la surface du solide qui se trouve au dessus de la surface de contact?

- La localisation, sur les schémas, des forces de frottement exercées sur les surfaces des solides en contact permet-elle de savoir avec précision sur quel solide chaque force s'exerce?

- Le frottement en général est-il considéré par les étudiants comme étant une propriété intrinsèque des solides en contact ?

- La force de frottement qui s'exerce sur chaque solide en contact avec un autre se distingue-t-elle du phénomène frottement existant entre les deux?

Ces questions ont déjà des réponses partielles. Nous pouvons dégager un certain nombre d'hypothèses que nous allons tester dans la suite de ce travail, à savoir que, pour une majorité d'étudiants:

H_1: Les forces de frottement cinétique (cas du glissement) qui s'exercent sur deux solides en contact s'opposent toujours aux mouvements des solides concernés (sans aucune référence aux mouvements de glissement relatifs entre eux).

H_2 : Les forces de frottement statique (cas du non glissement) qui s'exercent sur deux solides en contact n'ont pas la caractéristique de s'adapter aux différentes situations physiques en fonction des autres forces en jeu: ces forces ont toujours un sens bien défini déterminé par le sens du mouvement donné des solides.

H_3: Les forces de frottement statique qui s'exercent sur deux solides en contact s'opposent toujours au mouvement effectif des solides concernés.

H_4: La loi des actions réciproques n'est pas appliquée dans l'étude du mouvement de deux (ou plus) solides en contact: les actions de contact entre les solides sont réduites à une seule composante tangentielle et à une seule composante normale aux surfaces en contact.

H_5: Les composantes horizontale et verticale de la résultante des actions de contact entre les solides n'agissent pas sur le solide qui se trouve en dessous de l'autre solide avec lequel il est en contact.

H_6: La localisation des forces de frottement exercées sur deux solides en contact ne permet pas de savoir de façon précise sur quel solide s'exerce chaque force de frottement: les forces de frottement s'exercent "entre" les solides et non sur chacun d'entre eux.

H_7: Les forces de frottement ne sont pas nettement distinguées du phénomène de frottement: le frottement existant entre deux solides en contact est considéré comme étant la force qui s'exerce sur le solide étudié (ou vice-versa).

Si toutes les hypothèses précédentes sont confirmées, et si on suppose que, comme en mécanique élémentaire, une force est attribuée à un objet (et non comprise comme une force d'interaction), il s'agit de savoir à quel objet est attribuée la force de frottement et de tenter de comprendre ce que cela implique sur la compréhension du phénomène frottement solide.

Au cours des deux chapitres suivants, nous allons tester ces hypothèses à l'aide de quatre questionnaires différents (deux sur le frottement cinétique et deux sur le frottement statique) proposés à des populations différentes, tant par leur pays d'origine que par leur niveau d'études.

CHAPITRE III

FROTTEMENTS CINETIQUE ET STATIQUE: QUESTIONNAIRES A (2 blocs) et B (sphère)

1- Introduction

Dans le but de tester les hypothèses et/ ou d'éclairer certaines questions soulevées aux chapitres précédents, nous avons construit deux types de questionnaires: les questionnaires A et B.

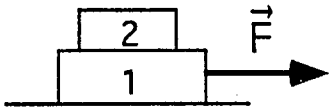
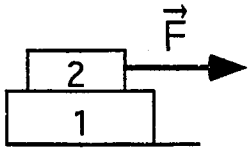
Avec les questionnaires A, nous avons repris une situation physique de frottement cinétique déjà étudiée dans l'enquête préliminaire: deux blocs (1) et (2), posés l'un sur l'autre, reposent sur une table horizontale. Une force horizontale constante est exercée sur l'un des deux blocs. On suppose qu'il n'y a pas de frottement entre la table et le bloc (1), alors qu'il en existe un entre les deux blocs. Dans le questionnaire A_1, la force horizontale s'exerce sur le bloc inférieur (1) et dans le questionnaire A_2 sur le bloc supérieur (2), afin de savoir si la localisation de cette force influe ou non sur les réponses. Ces questionnaires ont pour but de faire expliciter par les étudiants toutes les forces qui s'exercent sur chacun des deux blocs (vont-ils penser à la loi des actions réciproques? vont-ils, comme nous le croyons, ne dessiner qu'une seule force de frottement: dans ce cas, sur quel bloc agit-elle? dans quel sens est-elle? pourra-t-elle expliquer le mouvement du bloc sur lequel la force horizontale constante ne s'exerce pas? etc....) et de savoir si les forces de frottement cinétique s'opposent ou non toujours aux mouvements des objets sur lesquels elles sont appliquées, sans référence au mouvement relatif d'un solide par rapport à l'autre.

Avec le questionnaire B, nous avons repris une situation physique de frottement statique proposée par Donald E. SHAW (1979) qui fait rouler sans glisser un cylindre sur une table horizontale. Il montre ainsi que la force de frottement qui s'exerce sur le cylindre change de norme et de sens selon le moment de la force appliquée, c'est à dire selon la position, par rapport à l'axe du cylindre, du point d'application de la force extérieure. L'auteur déclare que ses étudiants ont été très étonnés par ces résultats. Cette situation nous a semblé intéressante à étudier car elle est très représentative du caractère "imprévisible" des forces de frottement statique qui s'adaptent et s'ajustent aux conditions dynamiques en jeu, selon les différentes tensions locales au contact. De façon plus générale, pour répondre à cet exercice, il faut accepter l'idée qu'une force de frottement

statique puisse changer de sens, voire s'annuler, sans pour autant changer quoi que ce soit à la nature des surfaces en contact, à la nature des solides en jeu et à la direction et sens de mouvement de ces solides.

2- Questionnaires A (2 blocs): Frottement cinétique

2-1- Enoncés des questionnaires A_1 et A_2

Questionnaire A_1	Questionnaire A_2
 Un bloc de masse m_1 repose sans frottement sur une table horizontale. Un bloc de masse m_2 repose sur le premier bloc Il existe entre les deux blocs un frottement. On exerce sur le bloc de masse m_1 une force constante $\vec{F}$.	 "Un bloc de masse m_1 repose sans frottement sur une table horizontale. Un bloc de masse m_2 repose sur le premier bloc. Il existe entre les deux blocs un frottement. On exerce sur le bloc de masse m_2 une force $\vec{F}$ constante.
On constate que le bloc m_2 se déplace par rapport au bloc de masse m_1. Questions: 1- Dessiner sur le schéma les forces auxquelles sont soumis les deux blocs. 2- La force de frottement sur le bloc de masse m_1 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de ce bloc? Justifiez votre réponse. 3- La force de frottement sur le bloc de masse m_2 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de ce bloc? Justifiez votre réponse. 4- On augmente le frottement entre m_1 et m_2. Cela va-t-il changer le mouvement du bloc de masse m_2, celui du bloc de masse m_1? Justifiez votre réponse."	On constate que les deux blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre. Questions: 1-Dessinez sur le schéma toutes les forces verticales et horizontales auxquelles sont soumis les deux blocs. 2- Quel est le sens du mouvement du bloc de masse m_2 par rapport à la table? la force de frottement sur ce bloc s'oppose-t-elle ou non au mouvement du bloc? Justifiez votre réponse. 3- Quel est le sens du mouvement du bloc de masse m_1 par rapport à la table? La force de frottement sur ce bloc s'oppose-t-elle ou non au mouvement du bloc? Justifiez votre réponse.

A part le fait que le bloc sur lequel s'exerce la force $\vec{F}$ diffère d'un questionnaire à l'autre, les différences entre ces deux questionnaires sont les suivantes:

- la première question du deuxième questionnaire demande de dessiner **toutes** les forces horizontales et verticales et non simplement les forces.

- les questions 2 et 3 du questionnaire A_1 sont ambigües puisqu'il n'est pas précisé par rapport à quoi les blocs se déplacent. Dans le questionnaire A_2, nous avons précisé qu'il s'agissait des mouvements des blocs par rapport à la table.

- la question 4 du questionnaire A_1 a été posée à quelques étudiants pour compléter la deuxième question. En effet, ayant constaté, lors de l'enquête préliminaire,

que les étudiants tracent souvent une seule force de frottement, nous voulions savoir si ce tracé correspondait à un oubli ou était représentatif d'un raisonnement spécifique. Pour cela, nous avons obligé les étudiants à se déterminer sur une éventuelle modification des mouvements des deux blocs.

2-2- Population interrogée:

Au total 255 étudiants ont été interrogés, (la répartition par questionnaire est indiquée dans le tableau 3).

- 140 étudiants brésiliens de la première année de l'Université de Vitoria, tous ayant choisi la section Génie mécanique, civil et électrique.
- 49 étudiants portugais de Faro qui suivent un enseignement pré-universitaire technique.
- 56 étudiants de première et deuxième année de DEUG A.

Notons enfin que tous ces étudiants, au moment de la passation des questionnaires, ont étudié les forces de frottement d'un point de vue assez élémentaire. Certes, il existe surement des différences entre ces populations, compte tenu du nombre d'heures accordées à l'étude des forces de frottement, du développement mathématique plus ou moins poussé, des types d'exercices traités. Cependant les brésiliens utilisent comme manuel de référence le Resnick et Halliday (1979), les français, le Alonso et Finn(1970) ou un manuel similaire tout comme les étudiants portugais, ce qui signifie que ces populations sont assez semblables, ce qui a été vérifié lors du dépouillement des questionnaires.

Tableau 3
Population interrogée

Pays	Population	Questionnaire
Portugal	N = 11 N = 38	Questionnaire A_1 avec les quatre questions Questionnaire A_2
Brésil	N = 58 N = 92	Questionnaire A_1 avec les quatre questions Questionnaire A_2
France	N = 36 N = 20	Questionnaire A_1 avec les trois premières questions Questionnaire A_2

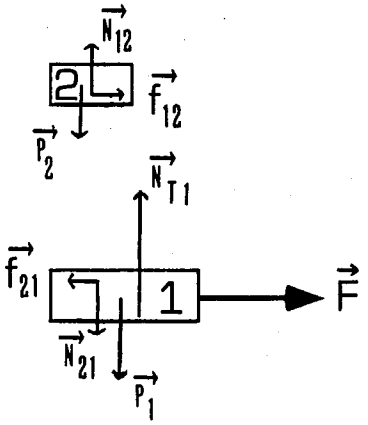
2-3- Réponses aux questionnaires

Avant de présenter les résultats, donnons rapidement les réponses aux questions posées, en explicitant les termes que nous utiliserons par la suite.

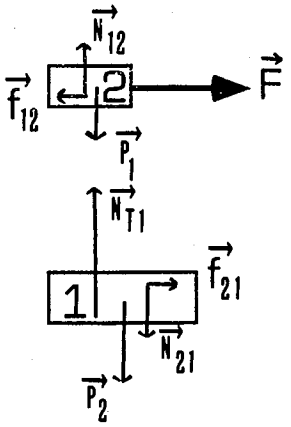
Les forces de contact sont, d'après la loi des actions réciproques, "mariées". Ceci signifie que si le bloc (1) exerce sur le bloc (2) une force de frottement horizontale $\vec{f_{12}}$, d'après la loi des actions réciproques, le bloc (2) exerce sur le bloc (1) une force horizontale de frottement $\vec{f_{21}} = - \vec{f_{12}}$. Il est classique dans l'enseignement de dessiner

ces forces à l'interface des deux blocs, si bien qu'il n'est pas toujours facile de savoir sur quel bloc s'exercent les forces dessinées. Pour des raisons de clarté, nous avons représenté sur la figure 1 ces forces sur des schémas éclatés afin qu'il n'y ait aucune ambigüité sur l'objet sur lequel elles s'exercent.

Questionnaire A1



Questionnaire A2



Les forces de frottement cinétique, tangentielles aux surfaces de contact, sont opposées au mouvement relatif d'un bloc par rapport à l'autre. Afin de distinguer les deux blocs, nous appelerons dorénavant bloc "moteur", le bloc sur lequel la force $\vec{F}$ est appliquée et bloc "passif" l'autre bloc. Partant du repos, le mouvement du bloc moteur par rapport au bloc passif ne peut être que dans le sens de $\vec{F}$; donc la force de frottement cinétique $\vec{f}_{pm}$ que le bloc passif exerce sur le bloc moteur s'opposera à ce mouvement. La force de frottement $\vec{f}_{mp}$ exercée par le bloc moteur sur le bloc passif est égale en norme à $\vec{f}_{pm}$ tout en étant de sens contraire; donc $\vec{f}_{mp}$ est dans le même sens que celui du mouvement du bloc moteur par rapport à la table et elle crée le mouvement du bloc passif.

Les forces verticales qui s'exercent sur les blocs sont de deux types:

- les forces gravitationnelles ou poids des différents blocs : $\vec{P}_1$ et $\vec{P}_2$
- les réactions ou forces de contact verticales : $\vec{N}_{12}$, $\vec{N}_{21}$,et $\vec{N}_{tab1}$

D'après la loi des actions réciproques $\vec{N}_{12} = -\vec{N}_{21}$

D'après la deuxième loi de Newton, on a, chaque bloc n'ayant aucun mouvement vertical:

- pour le bloc (2) $\vec{N}_{12} + \vec{P}_2 = 0$
- pour le bloc (1) $\vec{N}_{21} + \vec{N}_{tab1} + \vec{P}_1 = 0$

Ce qui permet d'obtenir que $\vec{N}_{12} = -\vec{P}_2$ et $\vec{N}_{tab1} = -\vec{P}_2 - \vec{P}_1$

Notons que, si les poids s'expriment en fonction des réactions, ils ne peuvent pas s'identifier à elles.

En ce qui concerne le mouvement horizontal des blocs, on a:

questionnaire A_1	questionnaire A_2
-pour le bloc (1) $\vec{F} - \vec{f_{21}} = m_1 \vec{a_1}$	- pour le bloc (1) $\vec{f_{21}} = m_1 \vec{a_1}$
- pour le bloc (2) $\vec{f_{12}} = m_2 \vec{a_2}$	- pour le bloc (2) $\vec{F} - \vec{f_{12}} = m_2 \vec{a_2}$

Enfin, si on modifie le frottement entre (1) et (2) (question 4 du questionnaire A_1), le mouvement des deux blocs changera puisque la résultante des forces exercées sur chaque bloc sera différente.

2-4- Résultats

Malgré les différences entre les deux questionnaires, les résultats sont très similaires, sauf sur un point que nous préciserons ultérieurement. Nous avons donc regroupé tous les résultats. Les pourcentages indiqués sont toujours calculés à partir de la population totale.

2-4-1- Schéma de forces

Le tableau 4 regroupe les réponses fournies pour les **forces de contact** horizontales et verticales. Nous avons distingué trois catégories de schémas:

- ceux sur lesquels n'apparaissent qu'une **seule** force (horizontale ou verticale), alors que d'après la loi des actions réciproques, il devrait en apparaître deux. Nous avons appelé ces forces "**forces solitaires**".
- ceux sur lesquels apparaissent le couple de forces correspondant à la loi des actions réciproques: nous les avons appelés "**forces mariées**".
- ceux sur lesquels rien n'est indiqué.

Tableau 4
Forces de contact solitaires ou mariées

		Forces horizontales			Forces verticales		
Quest.ion	Population	Solitaires	Mariées	Rien	Solitaires	Mariées	Rien
Quest A_1	Portugal N = 11	45,5%	54,5%	0%	91%	9%	0%
	Brésil N= 58	65,5%	34,5%	0%	86%	10,5%	3,5%
	France N = 36	69,5%	30,5%	0%	72,5%	16,5%	11%
	Total A_1 N = 105	**65%**	**35%**	**0%**	**82%**	**12,5%**	**5,5%**
Quest. A_2	Portugal N = 38	79%	21%	0%	89,5%	10,5%	0%
	Brésil N = 92	69,5%	30,5%	0%	88%	10%	2%
	France N = 20	60%	40%	0%	80%	15%	5%
	Total A_2 N = 150	**70,5%**	**29,5%**	**0%**	**87,5%**	**10,5%**	**2%**
Total $A_1 + A_2$	N = 255	**68,5%**	**31,5%**	0%	**85%**	**11,5%**	3,5%

Nous constatons qu'une très grande majorité des étudiants trace des forces solitaires, et ce d'autant plus que les forces sont verticales. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point. Il est frappant de noter que la force verticale **solitaire** n'est jamais la force $\vec{N}_{21}$ (la force que le bloc du dessus exerce sur le bloc du dessous) : cette force solitaire n'est jamais tracée, ni mentionnée.

2-4-2- Localisation et sens des forces de contact horizontales.

La question est de savoir sur quel(s) objet(s) est(sont) appliquée(s) cette ou ces forces de frottement. La surface de contact entre les deux blocs "*appartient aussi bien à l'un qu'à l'autre bloc: y attacher une force ne suffit pas à spécifier sur quel objet la force s'applique*" (Viennot, 1986). Ainsi, il est extrêmement important de savoir sur quel objet est exercée la force citée, ne serait-ce que pour établir l'équation du mouvement de l'un quelconque des blocs. Les réponses peuvent être regroupées en trois catégories distinctes:

- la ou les forces se trouvent à l'interface des deux blocs
- la force solitaire se trouve appliquée sur un seul bloc
- les forces mariées sont appliquées sur des blocs différents

Le tableau 5 résume ces résultats. Comme il n'y a pas de différence significative entre les différentes populations, pour un questionnaire donné, nous avons regroupé les résultats par questionnaire.

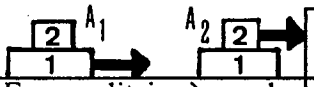
Tableau 5
Localisation des forces de frottement

Questionnaire	Population	Forces mariées ou solitaires à l'interface	force uniquement sur le bloc du dessus (2)	force uniquement sur le bloc du dessous (1)	forces mariées sur les 2 blocs
A_1	N = 105	65,5%	25,5%	0%	9%
A_2	N = 150	66,5%	20%	0%	13,5%
Total	N = 255	66%	22,5%	0%	11,5%

La majorité des étudiants dessine les forces de frottement à l'interface des deux blocs, ce qui est très habituel. Très peu d'étudiants trace une force solitaire sur le bloc du dessus, aucun sur le bloc du dessous et enfin un petit nombre dessine des forces mariées en isolant bien les objets sur lesquels ces forces sont appliquées, ce qui est inhabituel. Il n'apparaît pas de différences significatives entre les deux questionnaires au niveau des réponses.

La majorité des étudiants trace des forces de frottement solitaires (tableau 4). Il s'agit maintenant de regarder dans quel sens est cette force, ce que résume le tableau 6 qui détaille la colonne "forces horizontales solitaires" du tableau 4.

Tableau 6
Sens de la force de frottement solitaire

	A_1 N = 105	A_2 N = 150	$A_1 + A_2$ N = 255
Force solitaire à gauche ←	29%	70,5%	53,5%
Force solitaire à droite →	36%	0%	15%
Total des forces solitaires	65%	70,5%	68,5%

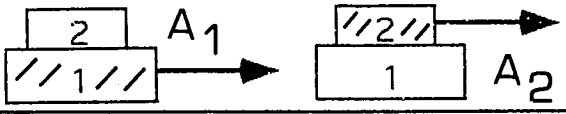
Ce tableau montre une très grande différence entre les deux questionnaires: aucun étudiant ne dessine de forces solitaires dirigées vers la droite dans le questionnaire A_2 (questionnaire pour lequel la force extérieure est appliquée sur le bloc du dessus), ce qui n'est pas le cas du questionnaire A_1. Nous allons tout d'abord étudier les réponses et les justifications fournies à la question portant sur le sens de cette force par rapport à celui du mouvement du bloc "moteur" (paragraphe suivant et tableau 7), puis à la question qui concerne le bloc "passif" (paragraphe 2-3-4 et tableau 8). Rappelons que ces forces solitaires sont dessinées soit à l'interface, soit sur le bloc du dessus, jamais sur celui du dessous.

2-4-3- Sens de la force de frottement par rapport au mouvement du bloc "moteur"

Dans les situations physiques étudiées, le sens de la force de frottement qui s'exerce sur le bloc moteur (c'est à dire celui sur lequel est exercée la force $\vec{F}$) est toujours de sens opposé à celui de son mouvement par rapport à la table. Les deux questionnaires A_1 et A_2 ont été posés afin de savoir si le bloc sur lequel était appliquée la force motrice avait ou non une influence. Le tableau 7 regroupe les résultats obtenus à la question 2 de chacun des questionnaires.

Tableau 7

Sens de la force de frottement par rapport au mouvement du bloc "moteur"

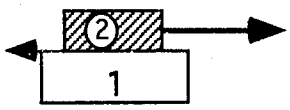
	Questionnaire A_1 N = 105	Questionnaire A_2 N = 150
Force de frottement s'**oppose** au mouvement du bloc moteur	46,5%	97,5%
Force de frottement **ne s'oppose pas** au mouvement du bloc moteur	53,5% (6 % + 47,5%*)	2,5%

La différence entre les réponses fournies aux deux questionnaires est étonnante: les deux situations proposées ne sont donc pas équivalentes pour les étudiants. Lorsque la force $\vec{F}$ est appliquée sur le bloc supérieur (questionnaire A_2), il y a quasi unanimité pour dire que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc sur lequel est appliquée cette force; lorsque la force $\vec{F}$ est appliquée sur le bloc inférieur (questionnaire A_1), il n'en est plus de même. Pour essayer de comprendre cette différence dans les réponses, analysons les justifications fournies questionnaire par questionnaire.

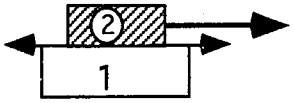
a) Réponses au questionnaire A_2

Les étudiants déclarent de façon unanime (97,5%) que la force de frottement s'oppose au mouvement. A titre d'illustration, voici des citations* accompagnant les deux types de schémas observés avec ce questionnaire (forces mariées ou force solitaire à gauche).

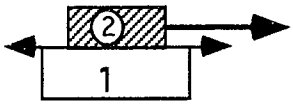
* Nous avons systématiquement hachuré dans les schémas correspondant à chaque citation le bloc sur lequel porte la question.



" Le sens du mouvement de (2) est vers la droite. Oui, la force de frottement ***s'oppose au mouvement*** *puisqu'elle est toujours* ***contraire au mouvement des corps.*** *Sa fonction est d'essayer de* ***freiner*** *le mouvement des corps."*



" Le sens du mouvement est de la gauche vers la droite, parce que la force tire le corps dans ce sens là. La force de frottement ***s'oppose au mouvement*** *de (2) puisqu'elle est toujours contraire à la force qui tire ou qui pousse un corps vu que cette force est* ***une force de résistance.*** *"*



" Le bloc 2 se déplace vers la droite, parce que la résultante des forces exercées sur m_2 a seulement une composante vers la droite. La force de frottement a le sens contraire de la force qui tire le bloc et elle ***s'oppose au mouvement.*** *"*

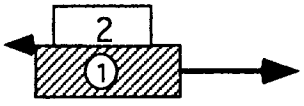
En résumé, avec le questionnaire A_2, la force de frottement sur le bloc moteur est, à juste titre, opposée au mouvement de ce bloc et opposée à la force $\vec{F}$.

Les quelques réponses (2,5%) " force ne s'oppose pas" sont en fait ambigües car les étudiants disent que "*la force de frottement n'empêchera pas le bloc (2) de se déplacer vers la droite*", alors qu'ils ont dessiné une force solitaire à gauche (c'est à dire de sens contraire à $\vec{F}$). L'étudiant a-t-il compris qu'opposer signifiait empêcher?

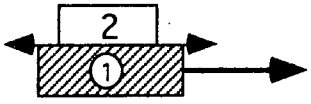
b) Réponses au questionnaire A_1.

Les étudiants se répartissent en deux groupes distincts et de taille sensiblement équivalente :

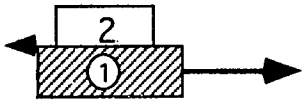
- Le premier groupe (46,5%) (étudiants ayant dessiné soit des forces mariées, soit une force solitaire à gauche) répond que la force s'oppose au mouvement du bloc (1), car:



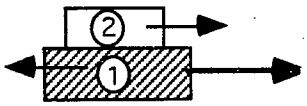
" Elle s'oppose au mouvement de (1) car d'après le schéma $\vec{f}$ est opposée à $\vec{F}$, car la force de frottement ***s'oppose toujours au déplacement.*** *"*



" La force de frottement sur m_1 ***s'oppose bien*** *au mouvement car s'il n'y avait pas de frottement exercé sur m_1, le bloc se déplacerait plus rapidement."*



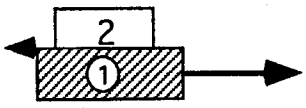
" La force de frottement ***s'oppose au mouvement du bloc par définition.*** *"*



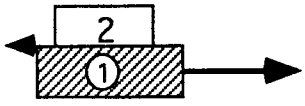
"Elle s'oppose au mouvement de 1. La force de frottement agit toujours de façon ***destructive*** *quelque soit le mouvement."*

Ces étudiants pensent, comme leurs camarades du questionnaire A2, que la force de frottement s'oppose **toujours** au mouvement.

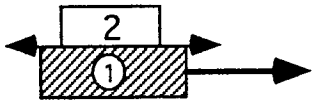
- L'autre groupe (53,5%) est constitué de 6% d'étudiants qui ont tous dessiné une force solitaire à droite et qui ont fourni des justifications incompréhensibles et de 47,5% d'étudiants qui ont dessiné aussi bien des forces mariées que des forces solitaires à gauche ou à droite et qui déclarent que la force ne s'oppose pas au mouvement car la force n'existe pas, ou, si elle est reconnue exister, elle n'agit pas:



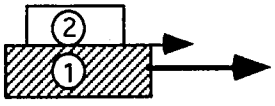
" Pas du tout, étant donné qu'il n'y a pas de frottement sous le bloc m_1, celui-ci est donc libre de tout mouvement. ***La force de frottement qui existe sur le bloc m_1 ne joue aucun rôle quand au mouvement de celui-ci."***



"Non, la force de frottement ne s'oppose pas au mouvement, car la force de frottement s'applique entre les blocs (2) et (1) et ***la seule chose qui peut gêner le mouvement serait les frottements entre (1) et la table."***



"La force de frottement sur (1) ne s'oppose pas au mouvement car le frottement sur (1) est une force de (2) sur (1). Cette force concerne l'interface (2) (1). En fait, ***il n'existe pas de frottement sur le bloc (1) (frottement table/m_1 =0)."***



"La table horizontale ***n'exerce aucun frottement sur la masse m_1: il n'y a donc pas de force qui s'oppose au mouvement de (1).*** *La masse m_1 exerce sur la masse m_2 une force de frottement;* ***la force exercée de retour par la masse m_2 n'influe en rien le mouvement de m_1:*** *il y a seulement un mouvement des masses les unes par rapport aux autres."*

Ces citations sont pour le moins surprenantes: pour certains, il n'y a aucune force de frottement qui s'exerce sur le bloc moteur; pour d'autres, il y en a une (ces étudiants ont dessiné des forces mariées), mais elle n'a aucun effet. En lisant ces commentaires, en particulier le dernier, on peut se demander si les étudiants ne considèrent pas les deux blocs comme formant un tout, la force $\vec{F}$ s'appliquant à l'ensemble. Mais, dans ce cas,

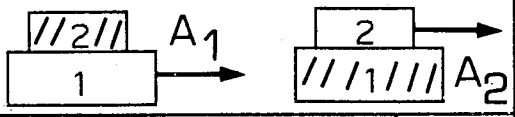
pourquoi ne rencontre-t-on pas des commentaires de ce type auprès des étudiants du questionnaire A2? Nous reviendrons sur ce point au moment de l'analyse des résultats.

2-4-4- Sens de la force de frottement par rapport au mouvement du bloc "passif".

La question 3 de chacun des questionnaires concerne le sens de la force de frottement par rapport au sens du mouvement du bloc "passif", c'est à dire le bloc sur lequel aucune force $\vec{F}$ n'agit. Le tableau 8 résume les résultats obtenus.

Tableau 8

Sens de la force de frottement par rapport au mouvement du bloc "passif"

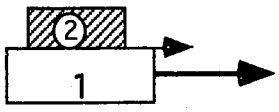
		Forces mariées		Forces solitaires			
				à droite →		à gauche ←	
Questionnaires	A1+A2 (255)	A1 (105)	A2 (150)	A1 (105)	A2 (150)	A1 (105)	A2 (150)
La force **s'oppose** au mouvement du bloc passif	**61,5%**	19%	1,5%	22%	0%	27%	**56%**
La force **ne s'oppose pas** au mouvement du bloc passif	33%	15%	23,5%	12,5%	0%	2%	12%
Pas de réponse	5,5%	1%	4,5%	1,5%	0%	0%	2,5%
Total de chaque colonne	100%	35%	29,5	36%	**0%**	29%	**70,5%**

La première ligne concerne les étudiants ayant déclaré que la force de frottement s'opposait au mouvement du bloc passif et la seconde ceux pour lesquels la force de frottement ne s'opposait pas au mouvement du bloc passif. Les pourcentages sont calculés à partir de la population totale des étudiants indiquée en haut de chaque colonne.

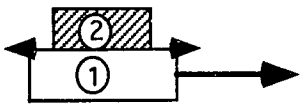
Les pourcentages, en bas de chaque colonne, indiquent le pourcentage total d'étudiants ayant dessiné dans chaque questionnaire des forces mariées (colonnes deux et trois), des forces solitaires à droite (colonnes quatre et cinq) et des forces solitaires à gauche pour les deux dernières colonnes. Le chiffre indiqué en bas d'une colonne est donc égal à la somme des chiffres d'une colonne puisqu'il s'agit de la même population.

Un premier constat: un tiers des étudiants (33%) pense que la force de frottement ne s'oppose pas au mouvement du bloc passif. Cependant tous ne justifient pas leur réponse de la même façon. La majorité d'entre eux déclare, à juste titre, que la

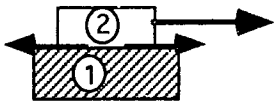
force de frottement **est responsable** du mouvement de ce bloc, comme l'indique ces citations.



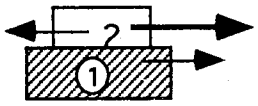
" La force de frottement $\vec{f_{12}}$ exercée par le bloc (1) sur le bloc (2) ne s'oppose pas au mouvement du bloc (2) dans le sens de $\vec{F}$. Au contraire, ***elle permet au bloc (2) de se déplacer vers la droite,*** *car sinon il glisserait sur (1) et tomberait derrière le bloc (1)".*



" La force de frottement ne s'oppose pas au mouvement de (2). Cette force ***produira le mouvement*** *du bloc, car, sur le bloc (2), on a $\Sigma F_x = f_2 = m_2 a_2$"*

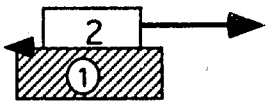


" Le bloc de masse m_1 se déplace vers la droite dans le sens de la force de frottement de (2) sur (1). La force de frottement ne s'oppose pas, au contraire, ***c'est la responsable du mouvement.*** *"*



" La force de frottement sur le bloc (1), c'est exactement ***la force qui lui imprime le mouvement;*** *elle ne s'oppose donc pas au mouvement. Si cette force n'existait pas, le bloc (2) se déplacerait librement sur m_1 et m_1 resterait immobile".*

Tous ces étudiants ont dessiné des forces mariées (questionnaires A_1 et A_2) ou une force solitaire à droite (questionnaire A_1). Seuls des étudiants du questionnaire A_2 (ils sont au nombre de dix) déclarent que la force de frottement ne s'oppose pas au mouvement du bloc car:

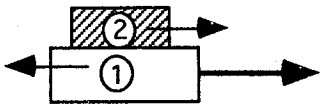


" Le bloc m_1 se déplace vers la droite puisque la force $\vec{F}$ a ce sens là. La force de frottement sur m_1 ne s'oppose pas au mouvement puisqu'il n'y a pas un frottement qui agit sur (1) → frottement table/m_1 = 0."

Huit de ces étudiants ont tracé une force solitaire à gauche (en sens contraire de $\vec{F}$), localisée à l'interface, les deux autres ont tracé des forces mariées localisées elles aussi à l'interface. Il est intéressant de noter que seuls les étudiants du questionnaire A_2 reprennent, pour le bloc (1), l'argumentation utilisée par certains étudiants (§ précédent) du questionnaire A_1, pour lequel le bloc (1) était moteur : la force de frottement n'affecte pas le mouvement du bloc inférieur (1), où, selon eux, seul un frottement entre lui et la table pourrait avoir une influence sur son mouvement. Ainsi, ce type d'arguments n'apparaît que lorsqu'il s'agit du bloc du dessous.

Deuxième constat: la majorité des étudiants (61,5%) pense que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc passif. Parmi eux, on trouve:

- des étudiants (19%) du questionnaire A_1 qui ont tracé des forces mariées. Citons une justification, à titre d'illustration:

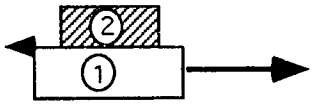


" Elle s'oppose au mouvement mais comme $f_{12} = f_{21}$, le bloc (2) suit le bloc (1)."

Ce type de commentaire que l'on rencontre uniquement avec le questionnaire A_1 est peut-être dû au fait que l'on demandait si la force de frottement s'opposait ou non au mouvement du bloc, sans préciser par rapport à quoi; commentaire qui justifie la forme donnée au questionnaire A_2.

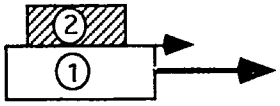
- les étudiants (49%) du questionnaire A_1 qui ont tracé une force solitaire dirigée vers la gauche (de sens contraire à $\vec{F}$) (27%) ou dirigée vers la droite (même sens que $\vec{F}$) (22%) déclarent:

- la force de frottement s'oppose car elle est de sens contraire à $\vec{F}$:

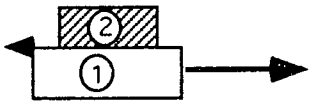


" Elle s'oppose au mouvement de (2) car le sens de f_2 est le contraire de celui de $\vec{F}$ "

- une force de frottement freine



*" S'il y a des **frottements, m_2 s'arrêtera au bout d'un certain temps.** Donc les forces de frottement s'opposent au mouvement du bloc vers la droite"*

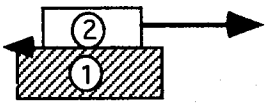


*"Le système n'est pas isolé s'il est soumis à des forces de frottement; donc il va **s'arrêter** car les forces de frottement s'opposent aux systèmes $m_1 + m_2$ puisque les blocs se déplacent ensemble."*

On retrouve ici l'idée que, lorsqu'il y a des frottements, le système considéré finit par s'arrêter; ce qui signifie qu'une force de frottement freine, s'oppose au mouvement puisqu'elle est résistante. La dernière citation laisse penser, là encore, que l'étudiant traite les deux blocs comme un tout. Nous aborderons ce point dans l'analyse.

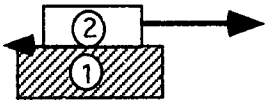
- des étudiants (56%) du questionnaire A_2 qui ont tracé une force solitaire à gauche (de sens contraire à $\vec{F}$). Pour tous ces étudiants, le mouvement du bloc (1) est bien vers la droite. Les commentaires sont de deux types:

- le premier, le plus fréquent, mentionne un entraînement de (1) par (2):



*"Il est étrange de considérer que m_1 bouge par rapport à la table sauf si la masse m_2 **entraîne** m_1 dans son sens et donc la force de frottement s'oppose au mouvement"*.

- le deuxième, plus rare, écrit la résultante des forces qui s'exerce sur (1):



" ..(le mouvement du bloc (1))*Vers la droite* $\vec{F_R} = \vec{F} - \vec{f}$. *Elle s'oppose au mouvement du bloc parce que, si cette force n'existait pas, le bloc ne pourrait pas se déplacer"*.

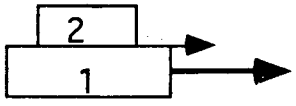
Cette dernière citation est pour le moins ambigüe. En effet, on ne sait pas très bien sur quel système cet étudiant raisonne :

- supposons qu'il considère comme système, l'ensemble des deux blocs comme la présence de la force $\vec{F}$ le suggère. Cette force est bien une force extérieure à ce système, mais alors la force $\vec{f}$ ne devrait pas être présente puisqu'elle est interne au système considéré.

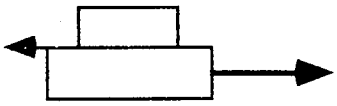
- supposons qu'il considère maintenant comme système le seul bloc (1). La force $\vec{F}$ ne devrait pas apparaître dans l'expression de la résultante, puisqu'elle ne s'exerce pas sur ce bloc. Il y a là un problème que nous aborderons au moment de l'analyse des résultats.

2-4-5- Réponses à la question 4 du questionnaire A_1

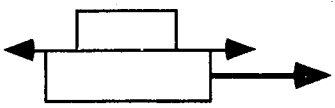
Seuls, 69 étudiants brésiliens et portugais ont eu à répondre à la question suivante: "on augmente le frottement entre les deux blocs (1) et (2). Cela va-t-il changer le mouvement du bloc (1), du bloc (2)?". 56,5 % de ces étudiants répondent qu'augmenter le frottement entre les deux blocs ne change rien au mouvement du bloc inférieur. Les raisons évoquées sont les suivantes:



" Seul le mouvement de m_2 sera modifié. L'augmentation du frottement empêche m_2 d'avancer tandis que m_1 ne modifiera en rien son mouvement".



"Le mouvement du bloc (1) ne changera pas parce que le frottement de ce bloc avec le sol ne change pas. Le mouvement de (2) sera modifié puisque l'augmentation du frottement avec (1) va provoquer une plus grande difficulté par rapport au déplacement de (2)".



*" Le mouvement de (2) changera parce que la force qui interfère(intervient) dans son mouvement va augmenter. Le mouvement de (1) ne changera pas parce que, malgré l'augmentation de la force de frottement sur ce bloc, **cette force ne conditionne pas son mouvement** (forces symétriques)".*

On retrouve ici que seul le frottement entre le bloc (1) et la table peut agir sur le mouvement de ce bloc.

2-5- Analyse des résultats:

Rappelons, tout d'abord, les résultats chiffrés les plus marquants :

- la majorité des schémas de forces ne comporte, pour les forces de contact (qu'elles soient verticales (**87,5%**) ou horizontales (**68,5%**)), qu'**une seule force**. La force solitaire horizontale est dessinée à l'**interface** des deux blocs (66% des réponses par rapport à la population totale ou 75% des réponses par rapport au nombre de forces solitaires). Cette majorité de forces solitaires indique que la loi des actions réciproques n'est pas très bien appliquée, voire comprise. Ce résultat n'est pas nouveau, L.Viennot (1979, 1989) et J.Ménigaux (1986) ont déjà montré ce qu'il en était en mécanique élémentaire.

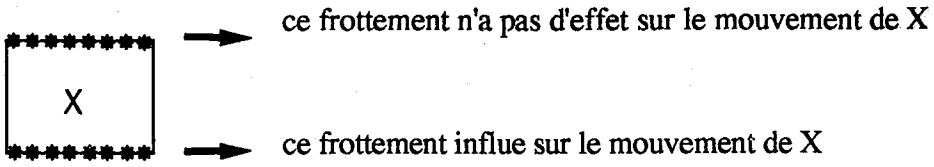
- une minorité d'étudiants (moins d'un tiers) dessine les forces de frottement dans le même sens que celui du mouvement du bloc passif.

- la majorité pense que **toute force de frottement est opposée** au **mouvement du mobile sur lequel elle agit** (sans référence au mouvement relatif) ou encore que toute **force de frottement freine** puisqu'elle est **résistante.**

a) Effet dessus-dessous

De nombreuses fois, nous avons mentionné que la force de frottement entre les deux blocs n'avait aucun effet sur le mouvement du bloc inférieur. Tout se passe comme si les étudiants pensaient que l'existence d'un frottement entre la partie inférieure (le dessous) d'un corps X et un autre corps influait sur le mouvement de X, alors qu'un frottement entre la partie supérieure (le dessus) de X et un autre corps n'influait pas sur le

mouvement de X: c'est ce que nous avons appelé **l'effet dessus-dessous ou effet DD**, schématisé sur la figure ci-dessous:



Nous avons rencontré la manifestation de cet effet à plusieurs reprises:

- lors de la question 4 du questionnaire A_1 où la majorité des étudiants (56,5%) pense que l'augmentation du frottement entre les deux blocs n'a aucune influence sur le mouvement du bloc du dessous. (cf. § 2-3-4).

- nous avons constaté une grande différence dans les réponses entre les deux questionnaires lorsqu'il s'agissait de savoir si la force de frottement s'opposait ou non au mouvement du bloc moteur (question 2 de chacun des questionnaires). Un nombre important d'étudiants (47,5% pour A_1) déclare qu'il n'existe pas de force de frottement s'exerçant sur ce bloc, ou que, si elle existe, elle n'a aucun effet, alors qu'aucun étudiant de A_2 ne mentionne un tel argument. La seule différence entre les deux questionnaires est la position du bloc moteur par rapport à la surface de contact: dans l'un des questionnaires (A_2), la surface de contact se trouve sous le bloc moteur et dans l'autre (A_1) dessus. Lorsque le bloc moteur (questionnaire A_2) est au dessus de la surface de contact, la force de frottement est alors reconnue exister et s'exercer effectivement sur ce bloc (c'est pour ce questionnaire que 97,5% des étudiants répondent que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc). Lorsque le bloc moteur est sous la surface de contact, nous trouvons des réponses où la force de frottement n'existe pas ou, si elle est reconnue exister, ne joue aucun rôle. Au total, nous trouvons, parmi les justifications, 47,5% des étudiants du questionnaire A_1 et 31,5% des étudiants du questionnaire A_2 qui mentionnent explicitement cet effet. La différence de pourcentages est sans doute due à la présence de la force $\vec{F}$: en effet, lorsque cette dernière est appliquée sur le bloc inférieur (1), elle explique à elle seule le mouvement du bloc, ce qui n'est pas le cas lorsqu'elle appliquée sur le bloc supérieur.

D'autres résultats vont dans le même sens, c'est à dire que le frottement est effectif sur le bloc qui se trouve au dessus de la surface de contact. En particulier :

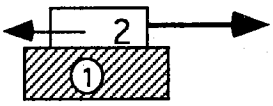
- aucun étudiant ne dessine de force solitaire horizontale sur le bloc inférieur (1) c'est à dire le bloc du dessous (cf. tableau 5), alors que ceux (ils sont peu

nombreux, certes) qui, ne la dessinent pas à l'interface, la dessinent sur le bloc du dessus. La force de frottement n'est jamais localisée sur le bloc du dessous.

- aucun étudiant qui a dessiné des forces solitaires ne dessine ou même ne mentionne une force verticale $\vec{N}_{21}$ c'est à dire une force exercée par le bloc du dessus sur le bloc inférieur (cf. partie 2-3-1). En revanche, la réaction du bloc (1) sur le bloc (2) est largement présente dans les schémas et les commentaires (85%).

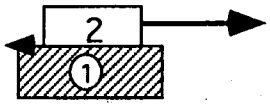
b) effet d'entraînement

Le problème, ici, est de comprendre comment les étudiants expliquent le mouvement vers la droite (dans le sens de $\vec{F}$) du bloc passif, c'est à dire du bloc sur lequel la force $\vec{F}$ n'est pas appliquée, alors que n'apparaît sur leur schéma que des forces solitaires, très souvent dirigées en sens contraire de $\vec{F}$, c'est à dire vers la gauche. Comment les étudiants peuvent-ils concilier le fait que le bloc passif se déplace dans le même sens que $\vec{F}$ et que la force de frottement est de façon majoritaire déclarée s'opposer au mouvement, par rapport à la table, de ce bloc? La réponse est à trouver parmi les justifications fournies:

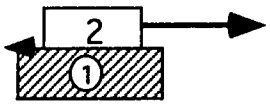


" *Le sens de déplacement de m_1 est le même que celui de m_2 car il existe un frottement entre m_1 et m_2 mais pas de force de frottement entre m_1 et la table. Donc m_1 est* ***entraîné*** *par m_2.* "

(Notons que cet étudiant trace une force solitaire à gauche localisée sur le bloc (2) et non à l'interface; il n'y a donc pour cet étudiant aucune force dessinée, exercée sur (1))

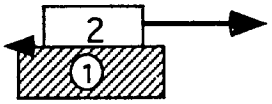


" *Il est étrange de considérer que m_1 bouge par rapport à la table sauf si la masse m_2* ***entraîne*** *m_1 dans son sens et donc la force de frottement s'oppose au mouvement*".

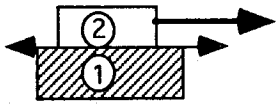


"*A* ***cause du frottement*** *entre les blocs, le mouvement de m_1 sera le même que celui de la force $\vec{F}$ sur m_2. S'il existait un frottement entre m_1 et la table, le frottement serait de sens contraire au mouvement de m_1. Le bloc m_1 se déplace seulement à cause du frottement avec 2 (parce que les* ***surfaces adhèrent les unes aux autres) puisque le frottement fonctionne comme un pont de transmission.*** *On ne peut pas oublier que m_1 se déplacera librement sur la surface sur laquelle il repose tout en accompagnant donc le sens de la force $\vec{F}$ sur 2.*"

Pour l'ensemble de ces citations, les forces de frottement dessinées sont **solitaires** et **de sens contraire à** $\vec{F}$: sur le schéma, on ne trouve donc aucune force nettement appliquée sur le bloc (1). Apparemment, le terme **frottement** suffit à expliquer **l'entraînement,** et vice versa. On ne voit pas très bien comment cet entraînement peut se faire. La dernière citation est beaucoup plus précise: le frottement fonctionne comme un **pont de transmission.** Mais quelle est la fonction de ce pont, que transmet-il?: s'agit -il de la force $\vec{F}$ ou s'agit-il d'autre chose? Il est extrêmement difficile de répondre de façon précise à cette question car les questionnaires n'ont pas été fabriqués avec l'intention d'éclaicir ce point, puisque ce dernier n'était même pas soupconné à l'époque de leur élaboration. Certaines citations peuvent laisser penser qu'il s'agit bien de la transmission de la force $\vec{F}$, comme par exemple:

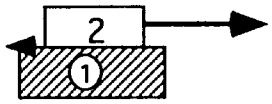


" Le bloc (1) se déplace vers la droite parce qu'il n'y a pas de frottement exercé sur (1) (frottement sol/m1 = 0). ***m2 va provoquer le déplacement de m1.*** *La force de frottement sur (1) ne s'oppose pas au mouvement, au contraire, c'est la* ***force de frottement entre les deux blocs*** *plus la force* $\vec{F}$ *qui provoque le mouvement de (1)".*

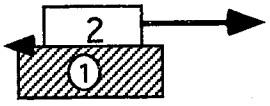


"Le bloc (1) se déplace dans le même sens que m2 parce que le frottement sol/m1 = 0. Ce mouvement se produit à cause ***des*** *frottements qui* ***tendent à unir*** *les blocs."*

Le raisonnement du premier étudiant illustre l'effet dessus dessous tout en citant les deux seules forces horizontales qui existent sur son dessin. On peut alors penser que cet étudiant traite le système des deux blocs comme formant un tout. Cependant, si on examine la deuxième citation, on constate que cet étudiant, qui a tracé des forces mariées, aurait pu expliquer le mouvement de (1) uniquement par la force située à l'interface et orientée dans le même sens que $\vec{F}$. Or, si le bloc (1) se déplace dans le même sens que (2), c'est, pour lui, à cause des frottements qui existent entre les deux blocs, puisque le frottement entre le sol et le bloc 1 est nul (effet dessus-dessous). Cet étudiant n'écrit pas que les deux blocs restent solidaires l'un de l'autre, mais simplement que *"les frottements entre les blocs tendent à les unir "* ? Que peut bien signifier cette phrase? Essayons de voir ce que disent d'autres étudiants :

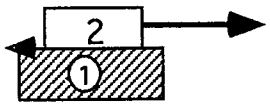


" Le bloc m1 se déplace vers la droite. La force de frottement ne s'oppose pas au mouvement. La ***contribution*** *de cette force est seulement de* ***maintenir les corps unis.****"*



" Le bloc m_2 se déplace vers la droite. La force de frottement ne s'oppose pas au mouvement puisque c'est le frottement qui fait que la masse m_2 est ***accrochée*** *à la masse m_1. Donc le* ***frottement va faciliter*** *le mouvement de m_1, ne s'y opposant pas."*

Pour le premier, la contribution de la force de frottement est de maintenir les blocs unis (il n'est toujours pas dit que les blocs restent solidaires); pour le second, le frottement tient les blocs accrochés. Les deux blocs forment-ils un corps rigide indéformable ou s'agit-il d'autre chose? On trouve un élément de réponse dans la citation suivante :

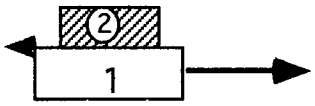


" Le sens de déplacement de (1) est aussi vers la droite quand on tire le bloc (2), ***ce bloc amène le bloc (1) avec lui à cause du frottement entre les deux blocs.*** *Le* ***bloc (1) aura une vitesse plus petite que le bloc*** *(2) parce qu'il a une masse plus grande et parce qu'il n'y a pas de force qui agit directement sur lui."*

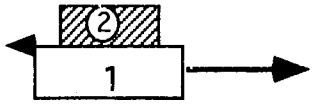
Là, il n'y a aucune ambigüité; les deux blocs ne forment pas un bloc unique: le frottement est responsable de l'entraînement du bloc (1) par le bloc (2); mais les deux blocs se déplacent à des vitesses différentes.

Pour l'ensemble de ces citations, le bloc passif est **entraîné** par le bloc moteur à cause **des** frottements: nous avons appelé cet effet, **effet d'entraînement.** Cet effet se manifeste à chaque fois qu'un étudiant déclare que le bloc passif est en mouvement dans le même sens que $\vec{F}$ sans se référer à aucune force de frottement ou avoir dessiné une force de frottement appliquée à ce bloc qui soit dans le bon sens ou bien quand la force $\vec{F}$ est explicitement transférée (partiellement ou en totalité du bloc moteur vers le bloc passif). L' existence " d' **un** frottement" ou " **des** frottements" **entre** les deux blocs, suffit à certains pour justifier l'entraînement du bloc passif. Pour d'autres, le frottement est perçu comme un "**pont de transmission**", pour reprendre l'expression d'un étudiant, ce pont permettant aux deux blocs de rester accrochés, tout en leur permettant de se déplacer à des vitesses différentes.

Regardons maintenant ce que disent les étudiants du questionnaire A_1 pour expliquer le mouvement du bloc passif, c'est à dire le bloc (2). Pour ceux-là, les réponses fournies sont souvent ambigües (cf. plus haut) car la question posée sur le sens du mouvement de (2) était elle-même ambigüe puisqu'on n'avait pas précisé mouvement par rapport à quoi. Cependant, il est frappant de retrouver quelques citations très voisines de celles obtenues avec l'autre questionnaire :



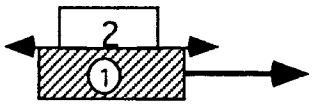
"Le système n'est pas isolé s'il est soumis à des forces de frottement; donc il va ***s'arrêter*** *car les forces de frottement s'opposent aux systèmes m_1 + m_2 puisque les blocs se déplacent ensemble."*



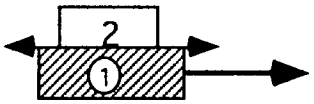
" Oui, la force de frottement empêche que le bloc m_2 se déplace en sens contraire de F et par conséquent la masse ***m_2 a une tendance à suivre le mouvement de m_1 à cause du frottement."***

La première citation parle de *système non isolé* à cause *des forces de frottement* (il s'agit du bloc (2)), ce qui est correct; mais ensuite suppose que "*les forces de frottement s'opposent aux systèmes m_1 + m_2* "(c'est à dire des blocs (1) et (2)), "*puisque les blocs se déplacent ensemble*". Là encore, cet étudiant parle des blocs qui se déplacent ensemble; mais rien ne dit que ces deux blocs sont solidaires l'un de l'autre. De même, avec la seconde, lorsque l'étudiant dit que " *la masse a tendance à suivre le mouvement de m_1 à cause du frottement*" il ne mentionne nullement que les blocs se déplacent ensemble comme un corps unique. On peut lire ces citations comme si le bloc moteur entraînait le bloc passif, ce qui fait que les deux blocs se déplacent dans le même sens, mais pas forcément à la même vitesse.

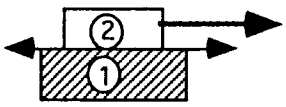
L'ensemble de ces citations est extrait de réponses d'étudiants qui ont tracé une seule force horizontale de frottement dirigée en sens contraire de la force $\vec{F}$. L'autre caractéristique essentielle de ces réponses est de ne pas expliquer le mouvement du bloc passif par l'existence d'une force appliquée sur lui. Cependant, cette caractéristique n'est pas réservée aux seuls étudiants qui ont tracé des forces solitaires. En effet, quelques uns (peu) tracent des forces mariées localisées à l'interface et déclarent:



" Pas du tout. Etant donné qu'il n'y a pas de frottement sous le bloc m_1, celui-ci est donc libre de tout mouvement. La ***force de frottement qui existe sur le bloc m_1 ne joue aucun rôle*** *quand au mouvement de celui-ci."*



"La force de frottement sur (1) ne s'oppose pas au mouvement car le frottement sur (1) est une force de (2) sur (1). ***Cette force concerne l'interface (2) (1).*** *En fait, il n'existe pas de force de frottement sur le bloc (1) (frottement table/m_1 = 0)"*



" Le bloc 1 se déplace dans le même sens que m_2 parce qu'il n'existe pas de frottement entre m_1 et le sol. Ce mouvement se produit à cause des ***frottements entre les blocs qui tendent à unir les blocs."***

Dessiner **deux forces de frottement à l'interface** n'est pas une garantie de compréhension du phénomène physique: ces trois étudiants illustrent l'effet DD et leur

commentaire peut se comprendre en admettant que le frottement est perçu, par eux, comme étant un lien localisé à l'interface et ayant tendance à unir les blocs.

En résumé, cet effet existe, pour l'essentiel, pour ceux qui ont dessiné des schémas avec une force de frottement horizontale solitaire localisée à l'interface et dirigée en sens contraire de $\vec{F}$ et qui ont déclaré que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc sur lequel elle agit . Cependant, on en rencontre quelques uns qui explicitent cet effet d'entraînement alors qu'ils ont, soit dessiné une force solitaire dans le même sens que $\vec{F}$ (*"m_2 se déplace dans le même sens que $\vec{F}$ car la force $\vec{F}$ sur m_1 est plus grande que la force de frottement entre m_1 et m_2.")* (questionnaire A_1), soit dessiné des forces mariées localisées à l'interface, l'une s'opposant au mouvement du bloc passif, l'autre servant à l'entraîner (*sur m_2, on a $\vec{f_2}$ qui s'oppose au mouvement et $\vec{f_1}$ qui l'entraîne vers l'avant"*).

Remarquons, enfin, que les termes utilisés par tous ces étudiants sont assez révélateurs: ils parlent, en effet, de frottement **entre les blocs,** ou de force de frottement **entre les blocs** ou déclarent qu'un **bloc est entraîné par l'autre** à cause **du** frottement ou **des** frottements, que c'est le frottement qui fait que m est accroché à..., qu'un bloc amène l'autre..... En revanche, tous ceux qui s'expriment en termes de force "motrice" pour le bloc passif n'utilisent aucun de ces termes.

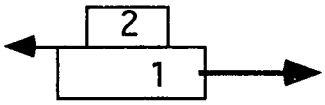
c) coexistence des deux effets

Nous avons déjà rencontré des citations d'étudiants où coexistent les deux effets: effet dessus-dessous et effet d'entraînement. Nous n'allons pas toutes les citer à nouveau. Nous voudrions simplement faire remarquer que ces deux effets ne s'opposent nullement, puisqu'ils peuvent même "s'épauler". En effet, lorsque la force de frottement n'est pas perçue, par les étudiants, comme étant une force pouvant créer le mouvement du bloc passif, le raisonnement utilisé varie selon la situation physique étudiée.

Dans la situation du questionnaire A_1, la force $\vec{F}$ est appliquée sur le bloc (1) inférieur : ce bloc est mobile grâce à la force $\vec{F}$. Pour un même étudiant, la force de frottement est déclarée ne pas agir sur lui (effet DD) dans une question, alors que dans une autre question du même questionnaire, le mouvement du bloc passif (2) vers la droite est expliqué par un effet d'entraînement: les deux effets cohabitent donc.

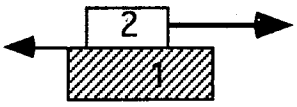
Dans la situation A_2, où $\vec{F}$ est exercée sur le bloc supérieur, la non existence ou non action de la force de frottement sur le bloc inférieur (effet DD) "oblige" de parler d'entraînement de ce bloc par le bloc supérieur pour rendre compte de son mouvement (les deux effets cohabitent et apparaissent dans la même question). Les citations suivantes, extraites de réponses fournies à chacun des questionnaires, illustrent ceci.

Situation A_1 (réponses fournies par le même étudiant aux questions sur le mouvement des deux blocs).

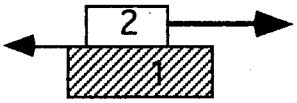


"Le bloc (1) se déplace sous l'action de $\vec{F}$. La force de frottement sur (1) n'agit pas sur ce bloc puisque le frottement m_1/sol est nul." (Effet DD)
" La force de frottement s'oppose au mouvement du bloc (2) parce qu'elle empêche que ce bloc se déplace en sens contraire à celui de $\vec{F}$; par conséquent, m_2 a une tendance à suivre le mouvement de m_1 à cause du frottement entre (1) et (2)." (Effet d'entraînement)

Situation A_2: (réponses fournies à la question sur le mouvement du bloc passif inférieur.)



"Le bloc m_1 se déplace vers la droite, suivant le bloc de masse m_2. La force de frottement ne s'oppose pas au mouvement de ce bloc. La contribution de cette force est seulement de maintenir les corps unis. La seule force qui peut gêner le mouvement de (1) est nulle (frottement sol/m_1 = 0)." (Effet DD + Effet d'entraînement)



" Le bloc (1) se déplace vers la droite parce qu'il n'y a pas de frottement exercé sur (1) (frottement sol/m_1 =0); m_2 va provoquer le déplacement de m_1. La force de frottement sur (1) ne s'oppose pas au mouvement, au contraire, c'est la force de frottement entre les deux blocs plus la force $\vec{F}$ qui provoque le mouvement de (1)." (Effet d'entraînement + Effet DD)

Ces étudiants, comme d'ailleurs 97,5% de leurs collègues, répondent que la force de frottement sur le bloc du dessus, c'est à dire du bloc (2) sur lequel la force $\vec{F}$ est appliquée, s'opposera au mouvement de ce bloc. Lorsque le bloc moteur est le bloc inférieur (situation A_1), 46,5% seulement répondent que la force de frottement s'oppose au mouvement de ce bloc, à cause de l'effet DD.

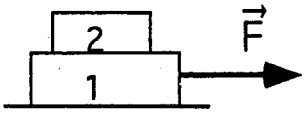
3- Questionnaire A_1 numérique:

Nous avons voulu savoir comment les deux effets (effet d'entraînement et effet DD) pouvaient intervenir dans la résolution d'un problème numérique: est-ce que la force $\vec{F}$ va être transférée d'un bloc à l'autre? Quelles procédures vont utiliser les étudiants

quand on leur demandera de calculer des accélérations? L'un des objectifs est de voir si la force $\vec{F}$ intervient ou non dans le calcul de l'accélération du bloc passif.

3-1- Enoncé du questionnaire:

" Deux blocs (1) et (2) sont posés l'un sur l'autre, le tout se trouvant sur une table horizontale. On suppose qu'il y a un frottement entre les deux blocs et aucun frottement entre le bloc (1) et la table. Le bloc (1) a une masse de 1kg et le bloc (2) une masse de 100g. On arrive à l'aide d'un système adapté à exercer sur le bloc (1) une force constante $\vec{F}$ de norme égale à 1N. On suppose que la force de frottement est constante en norme et vaut 0,2N. Quand on exerce la force $\vec{F}$ sur le bloc (1), on constate que les deux blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre.



Calculer l'accélération du bloc (2). Préciser le sens du déplacement de ce bloc par rapport à la table. Calculer l'accélération du bloc (1)".

Ce questionnaire a été donné en interrogation écrite à 21 étudiants de 1ère année de DEUG.

3-2- Résultats

Nous ne demandions pas de dessiner les forces. Malgré cela, nous constatons qu'un seul étudiant trace des forces mariées, tous les autres, quand ils dessinent des forces, les dessinent solitaires. Ces forces solitaires sont localisées essentiellement à l'interface.

Sur les 21 étudiants qui ont répondu:

- 14 donnent des valeurs différentes pour les deux accélérations
- 6 ne calculent que l'accélération du bloc passif, n'ayant pas abordé la deuxième question
- 1 donne une réponse raturée et illisible

Les accélérations correctes sont les suivantes: $\frac{f}{m2}$ pour le bloc passif et $\frac{F-f}{m1}$ pour le bloc actif. Aucun étudiant ne donne cet ensemble de réponse correcte.

Au total, aucun étudiant ne calcule une seule accélération en déclarant que c'est la même pour les deux blocs: les deux blocs sont peut-être liés mais ne sont pas solidaires.

Nous avons regroupé les réponses de la façon suivante:

- la réponse $a_1 = \frac{F}{m_1}$ est une réponse qui ne fait pas apparaître la force de frottement qui est exercée sur ce bloc: cette réponse est caractéristique de l'effet DD.

- les réponses $a_2 = \frac{F-f}{m_2}$ ou $a_2 = \frac{F-f}{m_1 + m_2}$ ou encore $a_2 = \frac{F}{m_2}$ sont caractéristiques de l'effet d'entraînement puisque la force $\vec{F}$ apparaît dans l'expression de l'accélération du bloc passif. Le sens de la force de frottement est opposé à celui du mouvement du bloc et le bloc est déclaré se déplacer vers la droite. La force $\vec{F}$ est "transférée au bloc passif à cause du frottement qui existe entre les blocs (comme l'ont déclaré plusieurs étudiants), ce qui permet au bloc passif de "suivre" le bloc moteur avec une force de frottement qui est de sens opposé à celui de son mouvement. On trouve aussi deux réponses avec $a_2 = \frac{f}{m_1 + m_2}$ et $a_1 = \frac{F}{m_1 + m_2}$: nous les avons également rangées dans la catégorie entraînement car les étudiants déclarent que le bloc (2) se déplace vers la droite avec une force de frottement vers la gauche: le bloc se déplace dans le même sens que celui de m_1, sans qu'aucune force "motrice" ne s'exerce sur lui. Les résultats sont regroupés dans le tableau 9

Tableau 9

Effet DD	Effet d'entraînement
10 (48%)	14 (67%)

Notons que certains précisent: "*que f est une force* ***entre*** *les deux blocs*", " *vrai si* $\vec{F}$ *est transmise totalement au bloc (2), ce qui est peu probable car il y a des frottements*" ou " *il y a déplacement de (2) car F est supérieure à f*".

- quelques étudiants (deux) donnent pour a_2, l'expression $a_2 = \frac{f}{m_2}$ en ayant tracé une force solitaire localisée à l'interface et dirigée en sens contraire de $\vec{F}$ et déclarent " *le bloc (2) se déplace vers la droite par rapport à la table*"; un autre projette correctement cette force f et écrit " $a_2 = -\frac{f}{m_2}$ *bizarre!!!*" puis pour le bloc (1) " $a = \frac{F}{M} = \frac{1}{1}$ *également bizarre !!!*"

- un dernier étudiant dessine une force solitaire localisée à l'interface et dirigée vers la gauche et écrit: " $a = \frac{f}{m_2}$. *Par rapport au premier bloc, le deuxième va dans le sens opposé au premier; par rapport à la table le sens du mouvement du deuxième bloc est celui du mouvement du premier (= sens de* $\vec{F}$ *)* " et ne calcule pas l'accélération du premier bloc.

Il ressort de ce petit exercice que les étudiants qui ne transfèrent pas la force $\vec{F}$ sur le bloc passif ont beaucoup de mal à expliquer le mouvement de ce bloc par rapport à la table: celui qui projette correctement les forces est très gêné, les autres, en ne

considérant que la norme de l'accélération, le sont beaucoup moins, bien que leur schéma de forces soit incohérent avec leur discours. Il est intéressant de noter qu'aucun étudiant n'explique le mouvement du bloc passif par une force de frottement dirigée dans le même sens que $\vec{F}$ et qu'aucun n 'envisage que le bloc passif puisse se déplacer vers la gauche.

4- Conclusion:

Ces questionnaires ont permis de mettre en évidence deux effets:

- **l'effet dessus-dessous** qui signifie que les forces de frottement dûes au frottement existant entre deux surfaces n'ont d'effet que sur la surface du dessus. Cet effet se manifeste par l'absence de force de frottement horizontale s'exerçant sur le solide du dessous, par une force verticale de contact toujours dirigée vers le bloc du dessus. Cet effet est compatible avec les forces de contact horizontales localisées à l'interface et solitaires. La force de frottement n'agit pas sur le bloc du dessous et n'est jamais localisée sur ce bloc; la force normale solitaire n'est jamais dessinée dans le sens du bloc du dessus vers celui du dessous. Ainsi, cet effet est caractéristique d'un raisonnement unidirectionnel (ici dans le sens dessous vers le dessus) et local. Nous avons vu une application pratique de ce phénomène lors de l'enquête exploratoire, lorsqu'il fallait déterminer la force normale qui s'exerçait sur le bloc du dessous. En effet, le calcul de la force horizontale de frottement se fait à l'aide de l'expression $f_c = \mu_c N$ (f= force de frottement cinétique exercée sur le bloc considéré, μ_c= coefficient de frottement cinétique entre les blocs et N est la force verticale que la surface de contact exerce sur le bloc). S'il n'existe pas de force normale exercée par le bloc du dessus sur le bloc du dessous et si le seul frottement qui peut gêner le mouvement est le frottement sol/bloc (nul dans ce cas), cela implique que la seule force normale qui agit sur le bloc du dessous sera la force que le sol exerce sur ce bloc et non la force que le bloc du dessus exerce sur le bloc du dessous. Dans la partie exploratoire, nous avons vu que, dans la situation des deux blocs, les étudiants brésiliens, soit étaient incapables de trouver la valeur de la force de frottement sur le bloc passif du dessous (bloc (1)), soit trouvaient sa valeur à l'aide de l'expression $f_c = \mu_c N$ où N est la force normale que la table exerce sur le bloc (1).

- **l'effet d'entraînement** se manifeste uniquement lorsque la situation physique en jeu implique l'étude du mouvement d'un bloc "passif", quelle que soit sa position relative par rapport au bloc moteur (en dessous ou au dessus), et que la force de frottement cinétique qui s'exerce sur lui crée le mouvement de ce bloc: on dit souvent, dans cette situation physique précise qu'il existe un "entraînement par frottement" du bloc "passif". Ce que nous avons appelé effet d'entraînement peut être aussi considéré comme un mouvement "d'entraînement par frottement"; mais les rôles des forces de frottement sont inversés: pour les étudiants, le mouvement du bloc "passif" est expliqué sans l'intervention de la force de frottement en tant que force qui crée le mouvement du bloc

étudié. Ainsi, pour les étudiants, le bloc "passif" se déplace tout en "suivant" le bloc "moteur", sans qu'aucune force dans le sens de son mouvement ne s'exerce sur lui. Le bloc passif peut suivre le bloc moteur parce que les deux blocs sont "liés" à cause du frottement qui existe entre eux: les blocs se déplacent ensemble, tout en pouvant se déplacer à des vitesses différentes (les blocs ont des "masses différentes" et "aucune force n'agit directement sur le bloc "passif", comme le déclarent certains étudiants).

Nous avons constaté, dans la phase exploratoire, que les étudiants avaient beaucoup de mal à accepter le fait que le force de frottement ne s'oppose pas au mouvement de l'objet sur lequel elle s'exerce et que le manuel de référence utilisé renforçait cette idée.

Avec les questionnaires A, nous avons également constaté que:

- la majorité des étudiants (61,5%) considère que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc passif (sans aucune référence au mouvement relatif des blocs);

- la majorité des étudiants (68,5%) trace des forces de frottement solitaires et de sens contraire à la force motrice $\vec{F}$ (53,5%);

- tracer des forces mariées n'est pas une garantie de compréhension du phénomène physique, tout comme tracer une force de frottement solitaire et de même sens que la force $\vec{F}$, puisque dans un certain nombre de cas, ces forces ne sont pas déclarées agir en tant que forces qui créent le mouvement du bloc passif;

- les forces de frottement solitaires et mariées sont en général localisées à l'interface des deux blocs (66%), ce qui ne permet pas de savoir nettement sur quel bloc elles s'exercent, puisqu'une surface de contact appartient aussi bien à un bloc qu'à l'autre;

Ainsi la force de frottement n'est pas perçue par les étudiants comme étant une force susceptible d'avoir un rôle de force "motrice". Cependant, c'est le caractère "résistant" de cette force qui permet aux blocs de rester accrochés et qui explique pourquoi l'un des blocs peut être entraîné par l'autre, sans qu'aucune force, s'exerçant sur lui, dans le sens du mouvement ne soit nécessaire: si le bloc passif ne résistait pas, il ne pourrait plus rester accroché au bloc moteur et ne pourrait donc pas davantage suivre le bloc moteur. C'est le frottement qui va permettre le mouvement du bloc passif car il tend à unir les blocs: en effet, si la force de frottement (même en sens contraire du mouvement du bloc passif) n'existait pas, le bloc ne pourrait pas se déplacer. Certains étudiants déclarent que, bien que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc passif, le frottement " *va faciliter*", " *va provoquer*", "*ne va pas empêcher*" le mouvement du bloc passif car si le frottement n'existait pas, le bloc ne pourrait pas se déplacer.

Par ailleurs, ces questionnaires suggèrent que:

- le frottement peut fonctionner comme un "pont de transmission", comme un lien entre les surfaces en contact puisque ces surfaces sont "*liées*", sont "*unies*" par le

frottement qui "*existe entre elles*", frottement qui permet que "*les surfaces adhèrent les unes aux autres*". Cette idée "d'adhérence" généralement associée à des situations statiques du point de vue du glissement* apparaît ici pour des situations physiques où intervient un frottement cinétique: d'un côté, les blocs passifs résistent parce qu'ils "adhèrent" aux blocs moteurs à cause du frottement, et de l'autre les blocs peuvent se déplacer ou glisser les uns par rapport aux autres. Ainsi, la notion "d'adhérence" n'est pas pour les étudiants réservée aux seules situations de non glissement.

- le phénomène de frottement (ici cinétique) est souvent confondu avec la force de frottement par laquelle on représente ce phénomène. En effet, les termes frottement et force de frottement sont utilisés l'un à la place de l'autre:

" *...le frottement serait de sens contraire au mouvement...* "

"*...puisqu'il n'y a pas un frottement qui agit sur (1)...* "

"*...au mouvement car le frottement sur (1) est une force de...* "

" *La table horizontale n'exerce aucun frottement sur la masse..* "

".. *parce qu'il n'y a pas de frottement exercé sur (1)*"

" *La force de frottement sur m_1 s'oppose bien au mouvement car s'il n'y avait pas de frottement exercé sur m_1...* "

Le frottement "*s'exerce sur*", "*agit sur*", "*est en sens contraire à* " car "*le frottement sur... est une force*".

5- Questionnaires B (sphère) : frottement statique

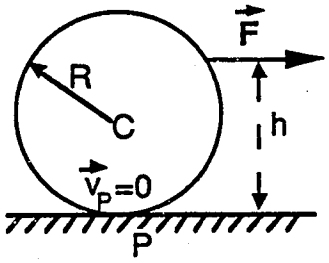
5-1- Enoncé des questionnaires B_1 et B_2:

Ces questionnaires ont en commun le texte décrivant la situation physique, la formulation des questions posées différant d'un questionnaire à l'autre.

Une sphère homogène de rayon R, de masse m et de moment d'inertie I repose sur une table horizontale.

Une force constante $\vec{F}$ est exercée sur la sphère à une hauteur h du plan de contact.

On admet que la sphère roule sans glisser par suite de la présence d'un frottement statique entre les deux surfaces de contact.



Un étudiant réalise plusieurs expériences au cours desquelles il fait varier le point d'application de la force $\vec{F}$, c'est à dire la hauteur h, sans ***changer la norme de*** *$\vec{F}$ et il obtient les résultats suivants, en unités arbitraires.*

---

* On trouve souvent dans la littérature les termes de "frottement d'adhérence", ou " d'adhérence" pour désigner le frottement statique ou seulement le frottement correspondant au cas statique du mouvement de roulement sans glissement (Strelkov,1978; Chappent et Picard, 1969; Buhot et Thuillier, 1973...)

Questionnaire B1

hauteur h	*force de frottement*
h_1	*- 0,6 F*
h_2	*- 0,4 F*
h_3	*- 0,1 F*
h_4	*0*
h_5	*+ 0,2 F*
h_6	*+ 0,5 F*

Le signe moins devant F signifie que la force de frottement est en sens contraire du mouvement du centre de masse de la sphère, le signe plus qu'elle est dans le même sens. F est la norme de la force extérieure exercée sur la sphère.
Ces résultats vous semblent-ils farfelus ou sérieux? Pouvez-vous justifier de façon sérieuse votre réponse?

Questionnaire B2

hauteur h	*force de frottement*	*interprétation*	
$h_1 = 0,5\ R$	*- 0,65F*	*la force de frottement est en sens contraire du mouvement de translation du centre de masse de la sphère*	*a*
$h_2 = R$	*- 0,3F*		
$h_3 = 1,2\ R$	*- 0,15F*		
$h_4 = 1,4\ R$	*0*	*la force de frottement est nulle, la sphère roule sans glisser*	*b*
$h_5 = 1,6R$	*+ 0,14F*	*la force de frottementest dans le même sens que le mouvement de translation du centre de masse.*	*c*
$h_6 = 1,8R$	*+ 0,28F*		

1- les résultats obtenus par cet étudiant et ses interprétations vous semblent--ils corrects? Justifiez votre réponse.
2- la norme de la force de frottement peut-elle prendre des valeurs différentes et même s'annuler selon les valeurs de h? Justifiez votre réponse.
3- La force de frottement peut-elle changer de sens selon les valeurs de h? Pourquoi?

Avec le questionnaire B1, nous avons constaté que les étudiants ont réagi sur deux points: la modification du sens de la force de frottement et sa valeur nulle. En revanche, aucun étudiant ne se réfère, dans ses réponses, à la variation de la valeur de la norme de cette force. Afin de les obliger à prendre position sur ce dernier point, nous avons fabriqué le questionnaire B2.

5-2- Population interrogée

Ces questionnaires ont été proposés à 48 étudiants répartis de la façon suivante:

Pays	Université	Niveau d'enseignement	Quest.	Nombre d'étudiants
France	Paris 7	DEUG 2	B_1	N = 24
Brésil	Sao Paulo	2ème année Université	B_2	N = 12
Brésil	Vittoria	1ère année Ingénieurs	B_2	N = 12

Les 48 étudiants interrogés ont tous étudié la mécanique du solide et les forces de frottement statique. Bien que ce nombre de 48 ne soit pas très élevé, les résultats obtenus sont suffisamment instructifs pour qu'ils soient mentionnés et analysés ici. Nous avons ensuite proposé à une population nettement plus importante composée d'étudiants et de professeurs de lycée des situations similaires plus "simples", en ce sens qu'elles sont beaucoup plus habituelles.

5-3- Présentation des résultats:

La situation physique abordée dans ce questionnaire peut être analysée par les étudiants qui ont étudié la dynamique de la rotation et les lois du frottement statique, dont un des exemples les plus fréquemment étudiés est celui du roulement sans glissement. Bien que ces étudiants soient censés savoir que le phénomène en jeu dans un roulement sans glissement est celui de frottement statique c'est à dire celui pour lequel la vitesse relative de glissement au point de contact est nulle, nous avons décidé de donner toutes ces informations dans l'énoncé du questionnaire. En effet, ce qui nous intéresse ici c'est de voir si les étudiants reconnaissent que, dans le cas d'un frottement statique, la force de frottement, en s'adaptant (en norme et sens) aux conditions dynamiques données, puisse changer de sens selon le point d'application de la force extérieure, sans pour autant que le sens de déplacement de la sphère ne soit modifié, et, dans le cas contraire, savoir comment ils vont réagir à cette situation.

Rappelons qu'en aucun cas nous ne demandions aux étudiants de résoudre mathématiquement ce problème, bien qu'ils aient tous les connaissances nécessaires pour le faire.

Avant de présenter les résultats, indiquons que les résultats proposés dans les questionnaires sont a priori compatibles avec les lois du frottement statique puisque la force extérieure s'exerçant sur la sphère est appliquée en des points différents, ce qui modifie les conditions dynamiques du système. En aucun cas, le sens de la force de frottement statique est déterminé à partir de celui du mouvement effectif de la sphère. La force de frottement statique $\vec{f_s}$ peut prendre n'importe quelle valeur, tant en norme (elle peut s'annuler) qu'en sens (il peut être opposé ou non à celui du mouvement du centre de masse de la sphère ou au sens de rotation, au contact, de la sphère) parce que la norme et le sens de cette force ne dépendent que des autres forces en jeu, ici $\vec{F}$: comme le point

d'application de $\vec{F}$ change, le vecteur moment (par rapport à O) de $\vec{F}$ change avec le point d'application, ce qui implique une modification de la norme et du sens de $\vec{f_s}$, le moment résultant permettant que la sphère puisse continuer à rouler sans glisser (cf. p16). Les résultats proposés sont donc possibles (et peuvent être corrects) car non contradictoires avec les lois du frottement statique. Si maintenant, on veut savoir si les résultats proposés sont corrects (mais cette question n'était pas posée), il est possible d'obtenir une réponse en essayant de déterminer l'éventuel mouvement relatif de glissement en absence de frottement ou encore en faisant le calcul complet: trois équations permettent d'obtenir la valeur de la mesure algébrique de $\vec{f_s}$ (à savoir $f_s = F\,(1-\frac{7R}{5h})$), qui correspondent à l'application de la deuxième loi de Newton au centre de masse de la sphère, du thèorème du moment cinétique et de la valeur nulle de la vitesse relative de glissement. La solution détaillée de ce problème se trouve en annexe.

La question ouverte du questionnaire B_1 n'a pas permis d'avoir des réponses précises sur un aspect important à nos yeux: la variation de la norme de la force de frottement statique, question explicitement posée dans la deuxième version du questionnaire. Cependant, il a été, en moyenne, très facile de classer les réponses et de réunir l'ensemble des résultats. Quand, par hasard, il apparaît des justifications différentes d'un questionnaire à l'autre (elles sont en nombre très limité), nous le mentionnerons. Intéressons-nous tout d'abord au sens de cette force.

5-3-1- Sens de la force de frottement

Le tableau 10 résume les résultats obtenus sur le sens de la force de frottement. pour les questionnaires B_1 et B_2.

Tableau 10
Modification du sens de la force de frottement

Population	Le sens de la force de frottement peut-il changer?			
	OUI	NON	autre	Rien
Brésil (N = 24) Questionnaire B_2	0%	88%	0%	12%
France (N= 24) Questionnaire B_1	0%	75%	8%	17%
Total (N=48)	0%	81,5%	4%	14,5%

Nous constatons que tous les étudiants qui ont analysé la question du changement de sens de la force de frottement (81,5%) déclarent que le sens de cette force est toujours le même. Pour certains d'entre eux, une modification du sens de la force de frottement implique une modification du sens de rotation de la sphère ou du sens de la force $\vec{F}$ appliquée. Les justifications fournies peuvent être regroupées en deux catégories distinctes:

-Pour 35% du total de la population interrogée, le sens de la force de frottement est opposé à celui du mouvement de translation du centre de masse de la sphère ou à celui de la force $\vec{F}$. Donnons quelques exemples:

> *"Non, la force de frottement ne peut pas changer de sens; s'il y a un frottement entre la surface et un point de la sphère en contact, il sera* ***toujours opposé*** *au mouvement du centre de masse."*

> *"Dès que la sphère se déplace toujours vers l'avant, la réaction du plan de contact sera toujours en sens opposé donc la force de frottement ne pourra pas changer de sens."*

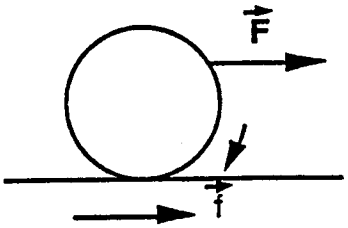
> *" La force de frottement n'a aucune raison d'être dans le même sens que celui de la force motrice."*

> *" Je ne suis pas d'accord avec les résultats où f est positif parce que la force de frottement est* ***toujours opposée*** *au mouvement et donc elle ne peut pas changer de sens."*

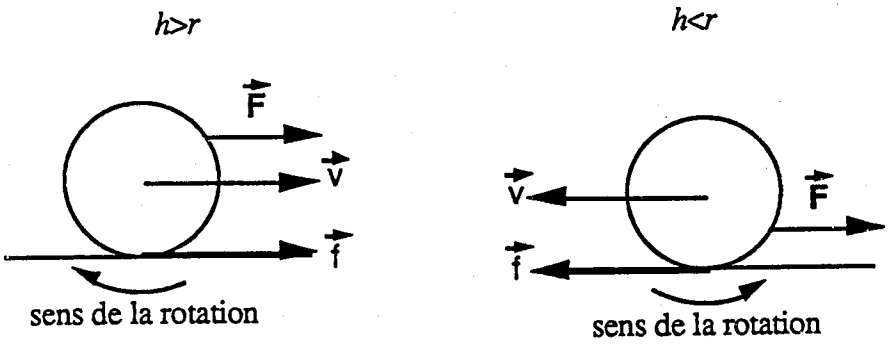
> *" La force de frottement seulement changera de sens quand la force F appliquée changera aussi de sens. Les différents points d'application de F ne changent en rien le sens de la force de frottement. Cette* ***force sera toujours opposée*** *au mouvement vers l'avant de la sphère."*

- Pour les derniers, 46% du total, le sens de la force de frottement est toujours opposé à celui du mouvement de rotation (au contact) de la sphère (donc toujours dans le même sens que celui du mouvement de translation du centre de masse de la sphère). Un grand nombre de ces étudiants déclare qu'une modification du sens de la force de frottement implique une modification du sens de la rotation de la sphère. Citons quelques justifications:

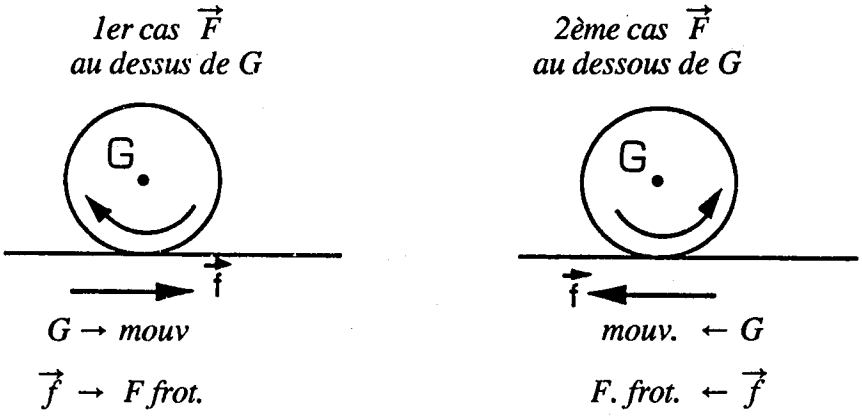
" La force de frottement s'oppose au glissement qui est toujours de sens contraire au déplacement. Cela implique que la force de frottement est dans le même sens que le déplacement et donc on ne peut pas avoir de valeurs négatives."



" La force de frottement s'oppose au glissement et elle sera donc toujours de même sens que la vitesse du centre d'inertie. On peut comprendre cependant que si h décroît, à partir de la hauteur h < R la translation du centre de masse changera de sens car le sens du roulement changera."

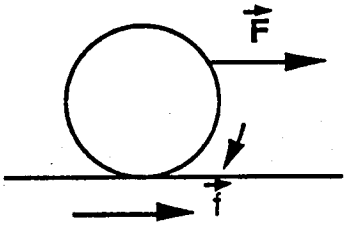


" Quand la force de frottement est appliquée au dessus du centre de masse, la sphère tourne dans le sens des aiguilles d'une montre; si elle est appliquée en dessous, la sphère tourne dans le sens trigonométrique. Dans le premier cas, le mouvement du centre de masse est vers la droite, dans le deuxième vers la gauche."



Pour cet étudiant, le mouvement (et non l'éventuel mouvement) de la sphère change de sens avec le point d'aplication de la force extérieure: le sens de la force de frottement statique dépend, pour lui, du mouvement effectif de la sphère (mouvement "vrai").

" La force de frottement a la caractéristique de s'opposer à la tendance au mouvement. Ainsi quand la sphère est tirée vers la droite, elle "pousse" le sol vers la gauche et il apparaît par conséquent une force de frottement vers la droite."



Ce dernier étudiant parle en termes de *tendance au mouvement*: on pourrait croire qu'il mentionne ce que nous avons appelé l'éventuel mouvement de glissement. Cette citation ne doit pas être isolée de la réponse qu'il a donné: la sphère se déplace toujours vers la droite et le sens de la force de frottement est toujours le même.

Nous constatons que pour **tous** ces étudiants (81,5%), le sens de la force de frottement **s'oppose toujours** au sens du mouvement considéré (soit le sens de la translation du centre de masse, soit celui du mouvement de rotation, au contact).

Deux étudiants du questionnaire ouvert B_1 (4% du total des étudiants) pensent qu'il ne peut pas y avoir de frottement s'il n'y a pas de glissement; mais nous allons y revenir à l'occasion des réponses concernant la norme de la force de frottement.

5-3-2- Norme de la force de frottement

Les commentaires sur la variation de la norme de la force de frottement apparaissent seulement dans le questionnaire B_2.

-54% des étudiants qui ont répondu à ce questionnaire déclarent que la norme de la force de frottement doit rester constante:

> *" Quelque soit la valeur de h, le frottement sera toujours le même pour une sphère de masse m soumise à une force constante $\vec{F}$. Jamais la force de frottement pourra s'annuler quelque soit le sens et le point d'application d'une force puisque cette force sera toujours opposé au mouvement considéré."*

> *" Non, la force de frottement est constante, ce qui peut varier avec h, c'est le moment."*

> *"Non, la force de frottement ne peut pas s'annuler et elle sera constante parce qu'elle dépend seulement de la force normale $\vec{N}$ exercée par la surface sur la sphère et du coefficient de frottement."*

> *" La force de frottement ne peut pas varier parce qu'elle dépend de la masse, de la gravité et de la surface de contact (qui sont des valeurs constantes)."*

- 25% des étudiants pensent que la force de frottement peut changer de norme, tout en gardant son sens inchangé:

> *"Oui, parce que le moment exercé sur la sphère change selon les h. Si le moment varie, cela implique que la norme de f va aussi varier (comme une réaction)."*

> *"Selon la hauteur, nous aurions différents angles d'application par rapport au point C."*

> *" Au fur et à mesure que le moment augmente la force de frottement va être vaincue."*

> *" Oui, la force de frottement agit toujours mais elle peut être plus petite et cela dépend du temps durant lequel la surface de la sphère reste en contact avec le sol."*

" *Oui, cela dépend du moment angulaire.* "

Seulement deux étudiants (les deux premiers) ont abordé correctement la question. Pour le quatrième, la norme de la force de frottement s'use avec le temps.

- 21% du total des étudiants n'ont pas répondu à cette question.

Quant à la question de savoir si la sphère peut rouler sans glisser avec une force de frottement nulle, nous avons pu regrouper les réponses obtenues aux deux questionnaires B_1 et B_2, car la majorité des étudiants du questionnaire B_1 ont mentionné ce point. Les résultats sont regroupés dans le tableau 11.

Tableau 11
Force de frottement nulle

Population	Le module de la force de frottement peut-il s'annuler?		
	OUI	NON	Rien
Brésil (N = 24) Questionnaire B_2	4,5%	80%	15,5%
France (N= 24) Questionnaire B_1	8,5%	71%	20,5%
Total (N=48)	6,5%	75%	18,5%

Les justifications fournies par les étudiants qui déclarent que la force de frottement ne peut pas être nulle, peuvent être regroupées en deux catégories:

- Pour une partie de ces étudiants, la force de frottement ne peut pas s'annuler puisqu'elle garde une norme constante au cours du mouvement. Nous avons trouvé des exemples de ce type de réponse lors des citations précédentes où " *la norme de la force de frottement est toujours constante*". Les autres déclarent:

> " *elle ne peut pas s'annuler parce que, avec $f = 0$, la sphère roule mais avec glissement.* "

> "*Pour $f = 0$: il n'y a pas de frottement, alors la sphère n'avance pas à moins qu'elle ne glisse; comme elle roule sans glisser, alors $f = 0$ est impossible.* "

Les argumentations fournies sont adaptées à d'autres problèmes physiques, comme par exemple celui d'une sphère qui roule sans glisser sur un plan incliné.

- Seulement trois étudiants déclarent que la norme de la force de frottement peut s'annuler car:

" *s'il n'y a pas de glissement, il ne peut y avoir de frottement*"

" *si f= 0, effectivemment la sphère ne glisse pas et elle va seulement rouler*"

Ici, c'est l'argumentation inverse qui suppose que la sphère ne peut pas rouler sans glisser avec un frottement différent de zéro.

5-3-3- Force de frottement et phénomène de frottement

On constate souvent que, pour les étudiants, le phénomène de frottement existant entre deux solides en contact n'est pas distingué de la force de frottement qui s'exerce sur chacun de ces solides: les termes "frottement" et "force de frottement" sont ainsi employés indifféremment l'un pour l'autre, comme l'illustrent les exemples suivants:

" *les **forces de frottement** sont dans le sens du déplacement car les **frottements** s'**opposent** toujours au déplacement...*"

"... *les **frottements** sont les mêmes en **direction** et **sens:** opposés au mouvement.*"

" *La **force de frottement** entre le plan et...*"

Le frottement est " **sens contraire à** " ou les frottements "**sont opposés à** ", " **ils ont une direction et un sens**" ou encore la force de frottement " **s'exerce entre**"...

5- 4- Conclusion :

Il ressort de l'ensemble de ces résultats que, pour les étudiants, les forces de frottement qui s'exercent sur des solides en mouvement de roulement sans glissement ne peuvent pas, pour un sens de mouvement donné, varier en norme et/ou sens selon les forces en jeu. En effet, aucun étudiant n'accepte l'idée que la force de frottement puisse changer de sens alors que le sens du mouvement du solide considéré ne change pas. Pour ces étudiants, la connaissance du sens des mouvements effectifs des solides suffit à déterminer de façon précise le sens des forces de frottement statique. Ce sens, pour la totalité d'entre eux est toujours opposé au sens du mouvement donné, que ce soit le mouvement de translation du centre de masse ou celui de rotation au contact.

La majorité des étudiants pense également que la norme de la force de frottement ne peut pas, de la même façon, changer; seulement deux étudiants ont exprimé correctement l'idée contraire.

L'ensemble de ces résultats indique:

a- La force de frottement statique n'est pas perçue comme une force qui s'adapte aux conditions dynamiques de chaque situation physique donnée, dans lesquelles le sens et la norme de cette force sont à priori inconnues et ne dépendent que des autres forces en jeu, puisque les tensions locales, au niveau du contact, sont différentes d'une situation physique à l'autre.

b- La force de frottement statique a, pour les étudiants, des propriétés similaires à celles d'une force de frottement cinétique: elle est déterminée à partir du mouvement effectif du solide étudié et s'oppose toujours à ce mouvement. Les étudiants qui considèrent que la force de frottement statique s'oppose au mouvement de translation du centre de masse de la sphère confondent le mouvement de translation pure (sans rotation) avec un mouvement de translation qui va avec la rotation de la sphère et qui n'implique pas forcément un mouvement de glissement au contact. Les étudiants qui considèrent que la force de frottement statique s'oppose au mouvement de rotation (au contact) de la sphère (c'est à dire au "mouvement de glissement" du point de contact pendant qu'elle roule), sont conscients du fait que le mouvement de glissement se passe au point de contact et qu'il est nul. Pourtant, le sens du mouvement de rotation au contact est, à leurs yeux, déterminant, et c'est ce qui les conduit à penser que la force de frottement garde toujours le même sens, en s'opposant au "mouvement", comme pour le frottement cinétique.

Ainsi, le phénomène de frottement statique, pour les étudiants, ne se distingue pas vraiment de celui du frottement cinétique.

c- il y a indifféremment utilisation du terme frottement à la place de celui de force de frottement et vice versa. Le phénomène de frottement (ici statique) est souvent confondu avec la force par laquelle on représente ce phénomène.

CHAPITRE IV
FROTTEMENTS CINÉTIQUE ET STATIQUE:
questionnaires C (3 blocs) et D (voiture)

1- Introduction:

Les résultats décrits au chapitre III nous ont permis de dégager quelques hypothèses sur les frottements cinétique et statique que nous allons confirmer avec les questionnaires C et D.

Frottement cinétique, questionnaire C:

Nous avons repris une situation physique similaire à celle des questionnaires A afin de mieux cerner l'effet dessus-dessous et l'effet d'entraînement ainsi que le rôle résistant associé à la force de frottement. Nous avons ainsi proposé une situation physique où trois blocs sont posés les uns sur les autres, le tout reposant sur une surface horizontale sans frottement. Une force horizontale, constante est exercée sur le bloc du milieu et il existe un frottement cinétique entre ce bloc et les deux autres, car les blocs se déplacent les uns par rapport aux autres. Comme pour la majorité des étudiants, il n'existe qu'une seule force de frottement horizontale qui est toujours dirigée en sens contraire de celui du mouvement donné (ou "vrai") de l'objet étudié, il s'agit en particulier de savoir si le sens de cette force dépend, pour eux, du sens de ce mouvement et non du mouvement relatif des surfaces en contact.

Frottement statique, questionnaire D:

Nous avons étudié le cas d'une voiture qui a ses roues motrices à l'avant et qui est arrêtée sur une route horizontale. Deux situations différentes sont proposées: dans la première, la voiture est en panne et son conducteur la pousse; dans la deuxième, le conducteur monte dans la voiture qui n'est plus en panne, met le contact et démarre. Pour ces deux situations, les étudiants doivent dessiner toutes les forces (et en particulier, les forces de frottement) qui s'exercent sur les différents objets. Nous avons voulu vérifier, sur une situation physique plus habituelle que celle des questionnaires B (sphère), que la

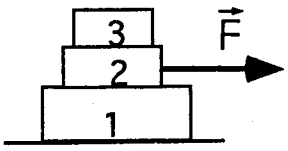
force de frottement statique était toujours considérée par les étudiants comme une force ayant un caractère "prévisible" (comme la force de frottement cinétique) dont le sens serait défini à partir de celui du mouvement effectif de l'objet étudié.

2- Questionnaires C (3 blocs): frottement cinétique

Deux questionnaires C_1 et C_2, différant sur quelques points ont été construits.

2-1- Enoncé des deux questionnaires C_1 et C_2:

Un bloc de masse m_1 repose sans frottement sur une table horizontale. Un deuxième bloc de masse m_2 repose sur le premier et un troisième de masse m_3 repose sur le bloc de masse m_2. Il existe un frottement entre les blocs (1) et (2) et entre les blocs (2) et (3). Une force horizontale $\vec{F}$ constante est appliquée sur le bloc (2). On constate que les blocs se déplacent les uns par rapport aux autres.



Questions

Questionnaire C_1	Questionnaire C_2
1) Dessiner sur le schéma, toutes les forces auxquelles les trois blocs sont soumis.	1) Dessiner sur les schémas ci dessous toutes les forces auxquelles chaque bloc est soumis, en identifiant chacune des forces représentées. (1) (2) (3)
2) Y-a-t-il des forces qui s'exercent sur le bloc (1). Si, oui, lesquelles et pourquoi? Le bloc (1) se déplace-t-il par rapport à la table ou reste-t-il immobile? Justifiez votre réponse.	2) Le bloc (1) se déplace-t-il par rapport à la table ou reste-t-il immobile? S'il se déplace, quel est le sens de son mouvement? justifiez vos réponses.
3) Y-a-t-il des forces qui s'exercent sur le bloc (3)? Si oui, lesquelles et pourquoi? Le bloc (3) se déplace-t-il par rapport à la table ou reste-t-il immobile? Justifiez votre réponse.	3)Le bloc (3) se déplace-t-il par rapport à la table ou reste-t-il immobile? S'il se déplace, quel est le sens de son mouvement? Justifiez vos réponses.
4) Quand on augmente le frottement entre les blocs (2) et (3), le mouvement du bloc (2) par rapport à la table est-il ou non modifié? Justifiez votre réponse.	4) On augmente le frottement entre les blocs (2) et (3) de telle façon que les blocs continuent à se déplacer les uns par rapport aux auttres. Cela va-t-il modifier l'accélération du bloc (2), du bloc (3). Justifiez vos réponses.

La situation des trois blocs, plus complexe que celle des deux blocs, a pour objectif de mettre en évidence l'effet dessus-dessous, avec un bloc du dessous qui soit

passif (1) ou moteur (2). En effet, avec les questionnaires "deux blocs", il existait un frottement entre les deux blocs et aucun entre la table et le bloc inférieur. Nous avions constaté une différence dans les réponses selon le bloc sur lequel était appliquée la force $\vec{F}$. Ici, avec la situation étudiée, le bloc sur lequel est appliquée la force $\vec{F}$ est le bloc du milieu qui "frotte" sur celui du dessus et sur celui du dessous. Cette situation permet également d'étudier l'effet d'entraînement sur les deux blocs passifs, l'un (3) situé au-dessus du bloc moteur et l'autre (1) situé en dessous.

Après passation du questionnaire C_1, nous avons constaté quelques ambigüités et nous avons donc élaboré le questionnaire C_2 qui se distingue du premier sur quelques points:

- obligation de dessiner les forces sur un schéma éclaté (ce qui n'a pas posé de problème de compréhension aux étudiants brésiliens qui avaient déjà travaillé sur ce type de schéma). Nous espérions ainsi voir si la force $\vec{F}$ apparaissait sur d'autres blocs que le bloc (2) sur lequel elle était exercée.

- il est demandé aux étudiants de préciser le sens du mouvement des blocs passifs, lorsqu'ils reconnaissent que ces blocs se déplacent par rapport à la table.

- à la quatrième question, il est précisé que les blocs continuent à se déplacer les uns par rapport aux autres et la question porte sur l'éventuelle modification de l'accélération de chacun de ces blocs.

Nous pensions, avec ces questionnaires:

- retrouver beaucoup de forces de contact verticales solitaires;

-retrouver beaucoup de forces de frottement solitaires, localisées essentiellement à l'interface pour le questionnaire C_1 (avec le questionnnaire C_2, nous verrons sur quel(s) bloc(s) est appliquée "la" force de frottement);

-constater un effet dessus-dessous à l'occasion des questions 2 et 4;

- préciser la notion d'effet d'entraînement ainsi que le rôle résistant associé à la force de frottement.

2-2- Population interrogée

Le questionnaire C_1 a été posé à 123 personnes dont:

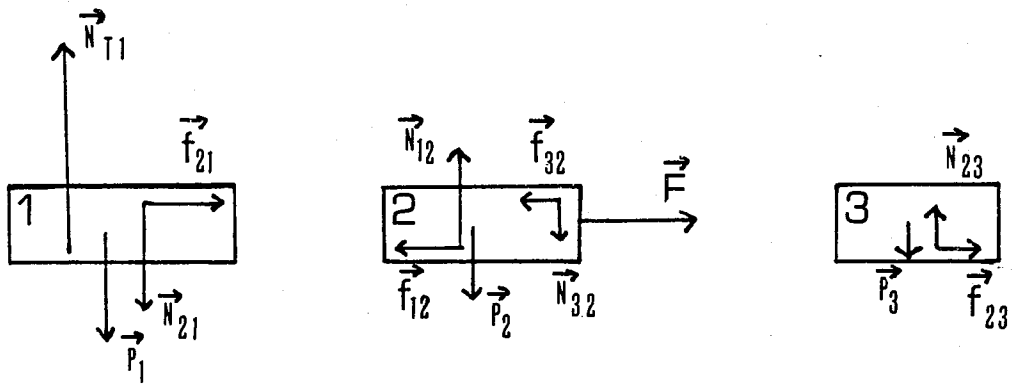
- 63 étudiants de première année et deuxième année de DEUG A - Paris;
- 12 étudiants de DEA de Didactique des Sciences Expérimentales - Paris;
- 48 professeurs de lycée espagnol (région de Valencia) dont 38 en stage de formation continue.

Le questionnaire C_2 a été posé à 64 étudiants de 1ère année de l'université de Vitoria (Brésil): sections génie mécanique, civil et électrique.

Au total 187 étudiants ont été interrogés. Les résultats montrent, qu'il est possible de regrouper les populations françaises et brésiliennes, comme nous l'avions déjà fait au chapitre précédent. En revanche, les résultats des espagnols sont systématiquement séparés des autres car ce sont tous des enseignants du secondaire qui ont fait au moins quatre années d'études scientifiques après le baccalauréat. Nous constaterons, cependant, que les résultats obtenus par ces enseignants diffèrent peu des résultats des autres.

2-3- Réponses aux questionnaires

Par souci de clarté, nous avons représenté les forces qui s'exercent sur chacun des blocs sur un schéma éclaté:



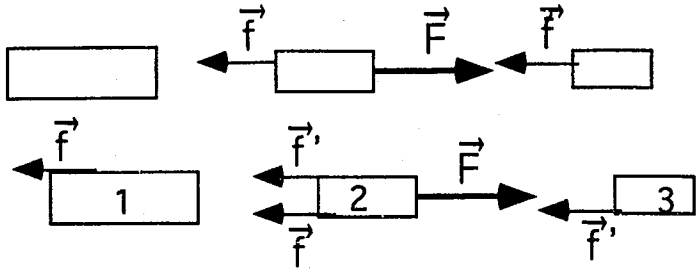
Le mouvement des blocs (1) et (3), par rapport à la table, est vers la droite puisque la résultante des forces horizontales sur ces blocs est égale, respectivement, à la force de frottement $\vec{f}_{21}$ pour le bloc (1) et $\vec{f}_{23}$ pour le bloc (3), forces dirigées vers la droite. Les forces verticales sur chacun des blocs ont une résultante nulle. Quand le frottement augmente entre les blocs (2) et (3), l'accélération de chacun de ces deux blocs est modifiée, puisque la résultante des forces sur chacun d'entre eux l'est aussi.

2-4- Résultats:

2-4-1- Schéma de forces

Le tableau 12 regroupe les réponses fournies pour les forces de contact horizontales et verticales en distinguant trois types de réponses: les réponses sans schéma de forces et celles avec des schémas sur lesquels sont représentées soit des "forces solitaires", soit des "forces mariées". Le questionnaire C_2 demandait de dessiner les forces sur des schémas éclatés. Certains étudiants dessinent des forces solitaires, d'autres font des schémas où l'on trouve des forces de frottement sur chacun des blocs, comme si

les forces étaient mariées, mais ces forces sont orientées dans le même sens, comme l'indique l'exemple suivant:



Ces forces ne sont donc pas mariées au sens de la loi des actions réciproques: il s'agit de la même force reportée d'un bloc à l'autre: nous les avons classées dans la rubrique "forces solitaires".

Tableau 12

Schéma des forces de contact (mariées ou solitaires)

Question	Population	Forces horizontales			Forces verticales		
		solitaires	mariées	aucune	solitaires	mariées	aucune
$C_1 + C_2$	France,Brésil N = 139	58,5%	30%	11,5%	76,5%	13,5%	10%
C_1	Espagne N = 48	55%	35,5%	10,5%	60,5%	10,5%	29%
Total	N= 187	57,5%	31,5%	11%	72%	13%	15%

Rappelons que les pourcentages indiqués dans ce tableau sont calculés par rapport à la population totale de chaque ligne. Nous retrouvons le même type de résultats qu'avec les questionnaires A: la majorité des personnes interrogées dessine des forces solitaires et ce d'autant plus qu'elles sont verticales.

2-4-2- Localisation des forces de contact horizontales (forces de frottement)

Nous retrouvons les trois rubriques définies lors des questionnaires A:

- les forces (solitaires ou mariées) se trouvent à l'une des frontières du bloc (cas du questionnaire C_2) ou encore à l'interface des deux blocs;
- la ou les forces solitaires se trouvent appliquées au milieu d'un des blocs;
- les forces mariées sont appliquées sur des blocs différents.

Tableau 13

Localisation des forces de frottement solitaires ou mariées

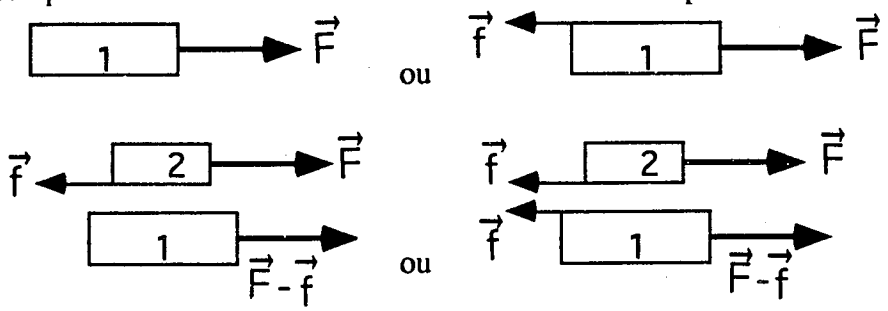
Question	Population	forces à l'interface	force solitaire sur le bloc passif du dessus	force solitaire sur le bloc passif du dessous	forces mariées sur 2 blocs différents (1,2) et (2,3)	rien
$C_1 + C_2$	France, Brésil N = 139	59%	13,5%	0%	16%	11,5%
C_1	Espagne N= 48	37,5%	23%	2%	27%	12,5%
Total	N = 187	53,5%	16%	0,5%	18,5%	11,5%

Nous retrouvons le résultat déjà observé lors des questionnaires A: la majorité des étudiants trace des forces localisées à l'interface. Notons qu'aucun étudiant ne trace de force solitaire localisée sur le bloc du dessous, seul un professeur espagnol le fait.

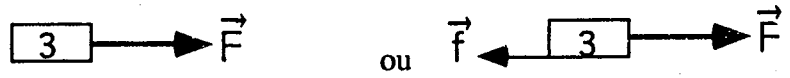
2-4-3- Résultats des questionnaires brésiliens avec les schémas éclatés.

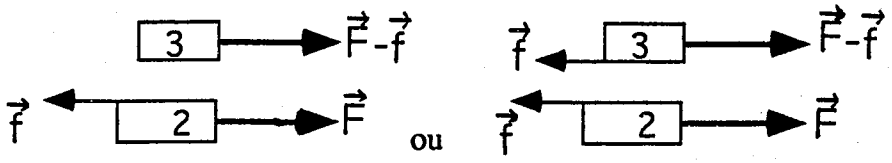
Sur les schémas éclatés imposés aux étudiants brésiliens, on voit apparaître des forces de frottement, comme nous venons de le voir, mais aussi des forces $\vec{F}$ sur des blocs sur lesquels cette force n'est pas appliquée. Nous trouvons, en effet, les résultats suivants:

a) 29,5% des étudiants font apparaître la force $\vec{F}$ sur le bloc inférieur (1), soit toute seule, soit par la différence $\vec{F} - \vec{f}$ comme l'illustrent ces exemples de schémas:

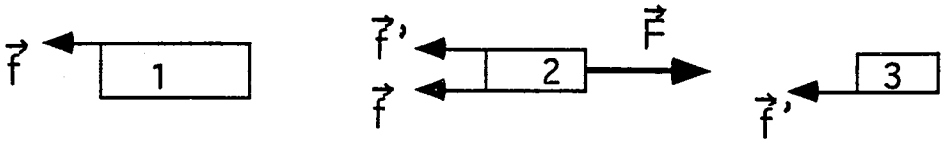


b) 22% des étudiants font apparaître cette force $\vec{F}$ sur le bloc supérieur (3), soit toute seule, soit par la différence $\vec{F} - \vec{f}$, comme l'illustrent ces exemples de schémas:





c) 39% des étudiants tracent bien des forces de frottement sur chacun des deux blocs en contact; mais ces forces sont les mêmes.



d) pour 33% des étudiants, il n'existe pas de force de frottement s'exerçant sur le bloc inférieur (1).

Ces catégories ne sont pas exclusives: en effet, un étudiant peut donner des réponses dans différentes catégories, comme par exemple, des schémas avec la force $\vec{F}$ et des forces de frottement identiques sur chacun des deux blocs en contact. Cependant, on trouve un pourcentage assez élevé (51,5%) d'étudiants qui tracent la force $\vec{F}$, qui rappelons-le est appliquée sur le bloc (2), sur l'un quelconque des blocs "passifs". Notons également que 39% des étudiants ont tracé la même force de frottement sur chacun des blocs en contact (catégorie c). Notons, enfin, qu'un tiers des étudiants n'a pas tracé de force de frottement sur le bloc inférieur.

2-4-4- Sens des forces de frottement solitaires

Le tableau 14 regroupe les résultats concernant le sens des forces horizontales solitaires, sans se préoccuper de leur localisation.

Tableau 14: Sens des forces de frottement solitaires

Forces de frottement	France, Brésil N= 139	Espagne N = 48	Total N = 187
Forces solitaires à gauche pour les 2 blocs passifs	49%	37,5%	46%
Forces solitaires à droite pour les 2 blocs passifs	6,5%	12,5%	8%
Forces solitaires: 1 à gauche, pour un bloc 1 à droite pour l'autre bloc	3%	4%	3%
Total des forces solitaires	58,5%	54%	57%

Nous constatons qu'une majorité relative d'étudiants trace une force de frottement solitaire à gauche, c'est à dire de sens opposé à la force $\vec{F}$.

2-4-5- Effet dessus-dessous

Rappelons ce que nous avons appelé l'effet dessus-dessous: étant donné un bloc X en contact avec deux autres blocs, la force de frottement qui s'exercerait sur l'interface supérieure de ce bloc n'aurait pas d'effet sur son mouvement, alors que la force de frottement localisée à l'interface inférieure aurait toujours une action sur son mouvement. Dans nos questionnaires, cet effet peut se manifester à deux moments: celui (question 2) où l'on pose des questions sur le bloc (1) et celui (question 4) où l'on modifie le frottement entre les blocs (2) et (3). Tous les étudiants tiennent compte du frottement sur le bloc du dessus. Seuls ceux qui déclarent que le frottement n'a aucun effet sur le bloc du dessous sont comptabilisés dans le tableau 15.

Tableau 15
Effet dessus-dessous

Question	France N = 75	Brésil N = 63	Espagne N = 48	Total N = 187
Effet DD (question 2)	25%	34,5%	23%	28%
Effet DD (question 4)	47%	25%	52%	40,5%

Nous constatons que cet effet est présent dans toutes les populations. Cependant, on le rencontre plus fréquemment lors de la question 4, sauf pour les étudiants brésiliens. Est-ce dû au fait que la question 4 n'est pas la même dans l'autre questionnaire (dans cette version, la question portait sur les éventuelles modifications du mouvement de chacun des deux blocs et non d'un seul), est-ce dû au fait que les étudiants brésiliens ont été les seuls à dessiner des forces sur des schémas éclatés? Cette dernière raison semble être peu pertinente, car nous avons vu un peu plus haut que presque un tiers des étudiants brésiliens ne dessine aucune force de frottement sur le bloc inférieur.
Citons, à titre d'illustration, des justifications rencontrées
lors de la question 2:

> *"Non car la force de frottement se situe **entre** les deux blocs et elle **n'agit que** sur m_2 et non sur m_1."*

> *" Non, car il n'y a pas de forces exercées sur le bloc (1). La force qui peut avoir des conséquences sur le mouvement , c'est le frottement sol/m_1 qui, dans ce cas, est nul."*

lors de la question 4:

"Pour modifier le mouvement de (2), on devrait augmenter le frottement entre (1) et (2), donc seulement le mouvement de (3) sera modifié."

" Non, le mouvement de (2) ne sera pas modifié si on augmente le frottement entre (2) et (3) parce que le frottement n'agit pas sur m_2 mais il agit sur m_3. "

" Le mouvement de (2) ne sera pas modifié parce que $\vec{F}$ est constante et ne dépend pas des forces situées au dessus de m_2. "

2-4-6- Sens de la force de frottement par rapport aux sens des mouvements des blocs "passifs".

Les deuxième et troisième questions de ces questionnaires demandent explicitement aux étudiants de préciser les mouvements des blocs, par rapport à la table, sur lesquels la force $\vec{F}$ n'est pas appliquée, c'est à dire ce que nous avons appelé les blocs "passifs". Il s'agit de savoir si, pour les étudiants, la force de frottement s'oppose ou non au mouvement du bloc passif, par rapport à la table. Nous allons nous intéresser aux seuls résultats de la troisième question, c'est à dire celle qui concerne le mouvement du bloc supérieur, afin de ne pas être géné par l'effet dessus-dessous. Le tableau 16 regroupe les résultats obtenus après l'analyse de l'ensemble des réponses à deux questions différentes: la première qui demande un schéma de forces et la troisième qui permet de savoir comment le bloc 3 se déplace par rapport à la table. Les justifications qui accompagnent cette dernière question permettent de savoir si la force de frottement s'oppose ou non au mouvement de ce bloc, par rapport à la table.

Tableau 16

Sens de la force de frottement par rapport à celui du mouvement du bloc supérieur par rapport à la table

	France, Brésil N= 139	Espagne N = 48	Total N= 187
Force de frottement **s'oppose** au mouvement du bloc passif	53,5%	39,5%	50%
Force de frottement **ne s'oppose pas au** mouvement du bloc passif	23%	29%	24,5%
Aucune réponse ou réponse inclassable	23,5%	31,5%	25,5%

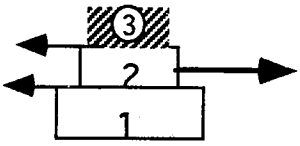
La moitié de la population interrogée justifie sa réponse en déclarant que la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc passif. Nous en trouvons un petit quart

qui précise qu'elle ne s'oppose pas, l'autre quart s'abstenant de répondre. Rappelons que la majorité d'entre eux dessine une force solitaire de sens contraire à $\vec{F}$.
Notons que les enseignants espagnols sont plus gênés que les étudiants pour répondre (31,5% d'abstention contre 23,5% chez les étudiants); mais on en trouve tout de même près de 40% qui pensent que la force de frottement s'oppose au mouvement, par rapport à la table, du bloc passif. Les justifications qui accompagnent la réponse "force de frottement ne s'oppose pas au mouvement du bloc passif" sont de même nature que celles que nous avons décrites lors du dépouillement des questionnaires A.

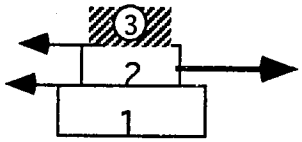
2-4-7- Effet d'entraînement

Les réponses aux questions 2 et 3 permettent non seulement de confirmer l'existence de l'effet dessus-dessous, mais aussi, ce que nous avons appelé, l'effet d'entraînement. Rappelons qu'un grand nombre de réponses et justifications fournies aux questionnaires A nous ont conduit à penser que le bloc "passif" se déplaçait par **entraînement** du bloc "moteur" à cause **des** frottements **entre** les blocs, sans qu'aucune force ne soit explicitement exercée sur ce bloc: il n'est pas nécessaire, pour ces étudiants, qu'une force s'exerce explicitement sur le bloc passif pour qu'il puisse se déplacer. En résumé, le bloc passif, initialement au repos, est entraîné par le bloc moteur à cause des frottements qui lient les deux blocs. Pour certains, il n'est pas nécessaire qu'une force dans le sens du mouvement s'exerce sur le bloc passif pour expliquer ce mouvement d'entraînement, la présence de frottements suffit; pour d'autres le mouvement d'entraînement est expliqué par un transfert de la force $\vec{F}$, pour d'autres encore, la force de frottement, dont le sens dessiné est celui du mouvement du bloc passif, n'est pas du tout considérée comme étant la force responsable du mouvement de ce bloc, mais comme une force qui résiste à la force motrice $\vec{F}$: elle permet aux étudiants d'expliquer l'entraînement, tout en lui octroyant un caractère résistant, (nous en verrons des exemples plus loin). Rappelons que cet effet d'entraînement du bloc passif "par frottement" ne suppose nullement que ce bloc passif reste solidaire du bloc moteur avec lequel il est lié: ces blocs ne se déplacent pas à la même vitesse car "*ils ont des masses différentes*" comme l'expriment certains étudiants.

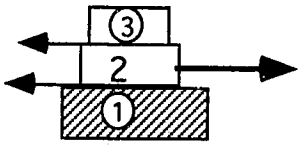
- Examinons quelques justifications (texte plus schémas de forces) fournies par les étudiants et les professeurs qui ont tracé des forces solitaires localisées à l'interface et de sens contraire à $\vec{F}$:



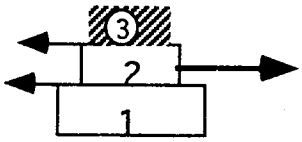
*" Le bloc (3) se déplace car il existe **des** frottements **entre** les blocs (2) et (3); m_2 bouge et **entraîne** nécessairement m_3 (ces frottements les rendent en partie solidaires)".*



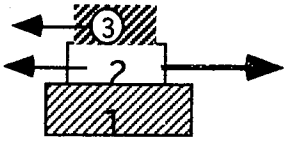
*" Le bloc (3) se déplace vers la droite car il est **entraîné** par le frottement qui le **lie** au bloc (2)."*



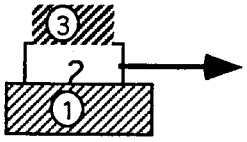
*" Le bloc (1) se déplace car le frottement table/m_1 = 0 et par conséquent (1) est **entraîné** par le déplacement de (2) car il existe un frottement **entre** eux."*



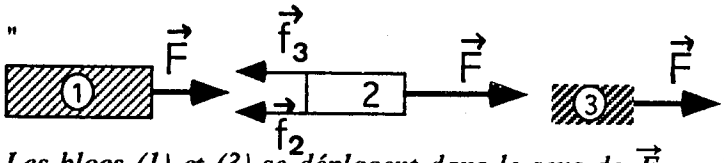
" Le bloc (3) se déplace vers la droite car le frottement entre m_2 et m_3 va transférer la force $\vec{F}$ sur le bloc (3)."



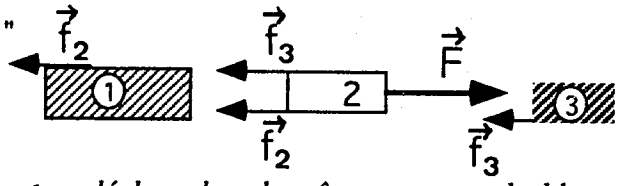
"Les blocs m_1 et m_3 se déplacent vers la droite par l'effet de la force $\vec{F}$." (citation d'un professeur)



"Les forces sur m_3 sont le frottement entre (2) et (3), le poids de (3) et la force $\vec{F}$. Le bloc (3) se déplace vu que $\vec{F}$ est aussi appliquée sur lui."(alors que $\vec{F}$ n'est pas dessinée sur le bloc 3 et qu'aucune force de frottement ne soit tracée) (citation d'un professeur)

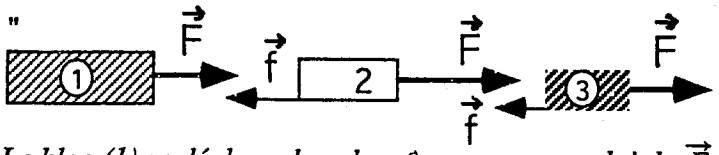


*Les blocs (1) et (3) se déplacent dans le sens de $\vec{F}$ qui est exercée sur (2) parce que comme il existe un frottement **entre** les blocs, il va exister une interaction entre eux."*



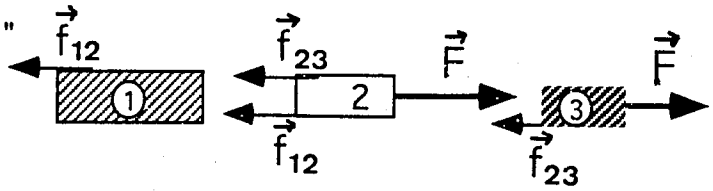
m_1 se déplace dans le même sens que le bloc m_2 car le frottement table/m_1 = 0 et le frottement entre (1) et (2) fait que le bloc se déplace dans le même sens.

m_3 se déplace dans le même sens que (2) puisqu'il existe un frottement entre les deux blocs, et quand le bloc 2 se déplace, il va ***emmener*** *le bloc 3 avec lui."*

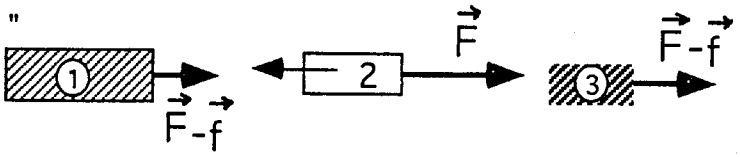


Le bloc (1) se déplace dans le même sens que celui de $\vec{F}$. A cause du frottement entre m_1 et m_2 la force agit aussi sur m_1.

m_3 se déplace aussi dans le même sens que celui de $\vec{F}$. Comme il y a frottement entre (2) et (3), la force appliquée sur m_2 aide à déplacer m_3."



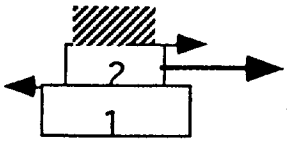
Le bloc (1) se déplace vers la droite car le frottement entre (1) et (2) va transférer la force $\vec{F}$ qui va faire déplacer le bloc. Le bloc (3) se déplace vers la droite. Le frottement entre (2) et (3) va transférer la force $\vec{F}$ sur le bloc (3)."



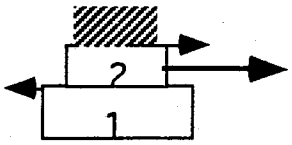
les blocs (1) et (3) se déplaceront dans le sens de $\vec{F}$ à cause du frottement entre m_1 et m_2 et m_2 et m_3 respectivement".

Ces citations montrent que les étudiants pensent que les blocs passifs sont entraînés par le bloc "moteur", soit par ce que les **blocs sont liés**, à cause du frottement, soit parce que la force $\vec{F}$ est purement et simplement transférée aux blocs passifs, puisqu'il existe une "interaction" entre les blocs passifs et le bloc moteur à cause du frottement. Remarquons que ces étudiants parlent en termes de frottements ou force de frottement **entre** les blocs et non en terme de force de frottement s'exerçant sur tel bloc.

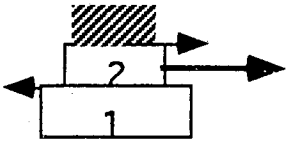
- D'autres étudiants tracent des forces solitaires, de même sens que la force $\vec{F}$. Citons quelques unes de leurs justifications:



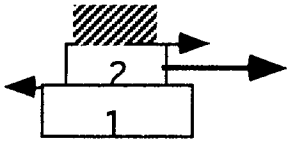
"m_3 se déplace dans le même sens que celui de $\vec{F}$ car la force $\vec{F}$ sur m_2 est plus grande que la force de frottement ***entre*** *m_2 et m_3."*



" m_3 va se déplacer à la même vitesse que m_2, car on peut considérer (2) et (3) comme un seul solide. Si $\vec{F}$ est moins importante que le frottement $\vec{f}$, aucune force horizontale agit sur (3). Par conséquent, il y a un déplacement de (2) et (3) si $\vec{F}$ est plus grande que $\vec{f}$."



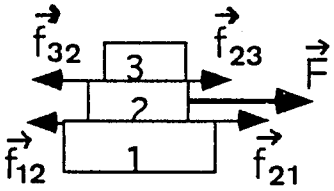
"m_3 va se déplacer tout en suivant m_2, parce qu'il existe un frottement entre m_2 et m_3 et la force $\vec{F}$ qui s'exerce sur m_2 fait aussi déplacer m_3. ".



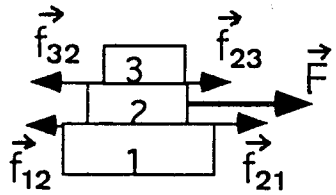
"Si on augmente le frottement entre (2) et (3), le mouvement de (3) va être modifié parce que le bloc (3) restera plus lié au bloc (2) et par conséquent restera plus longtemps sur le bloc (2)."

Pour ces étudiants, la force de frottement $\vec{f}$ est dirigée vers la droite (de même sens que $\vec{F}$); toutefois, cela ne leur suffit pas pour expliquer le mouvement vers la droite du bloc considéré. En effet, certains déclarent que le bloc ne pourra se déplacer que si la norme de $\vec{F}$ est supérieure à celle de $\vec{f}$, comme si cette force était en sens contraire de $\vec{F}$ et s'opposait au mouvement du bloc. La force de frottement a encore, pour certains, un caractère de "résistance" malgré son orientation dans le sens de celui du mouvement des blocs passifs.

- On retrouve ce type d'argumentation avec quelques étudiants qui ont tracé des forces mariées localisées à l'interface:



" L'augmentation du frottement entre (2) et (3) ne modifie pas les mouvements car $\vec{f}_{23} = \vec{f}_{32}$; en fait, les blocs (2) et (3) ne forment qu'un seul bloc."

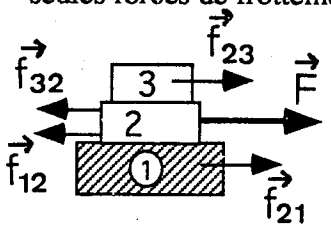


"Le bloc (3) peut rester immobile si $\vec{F} = \vec{f}_{23}$ car sur m_3 on a $\vec{f}_{23}$ qui s'oppose au mouvement et $\vec{f}_{32}$ qui l'entraîne vers l'avant."

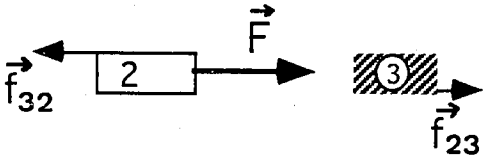
Ces étudiants dessinent bien des forces mariées; mais il leur faut trouver une force qui explique le mouvement du bloc passif vers la droite et concilier cela avec l'idée

qu'une force de frottement est toujours opposée au mouvement: un des membres du "couple" permet au bloc d'avancer et l'autre membre explique "la résistance "à l'avancement.

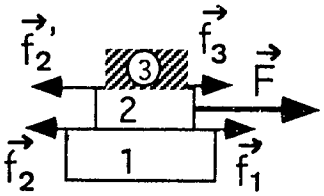
- Toutes ces justifications sont à comparer avec celles que donnent les étudiants et les professeurs qui acceptent l'idée que les blocs passifs puissent se déplacer grâce aux seules forces de frottement.



" Le bloc (1) se déplace parce que la résultante des forces sur lui est différente de zéro. $\Sigma\vec{F}_1 = \vec{f}_{21} = m_1\,\vec{a}_1$*."*



" Le bloc 3 se déplace vers la droite parce que la seule force horizontale appliquée sur le bloc est la force de frottement $\vec{f}_{23}$ *et elle est dirigée vers la droite."*



"Le bloc (3) se déplace parce que la résultante des forces exercées sur lui est $\vec{R} = \vec{f}_3 + \vec{N}_3 + \vec{P}_3 = m_3\,\vec{a}_3$ *;* $N_3 = P_3$ *donc* $f_3 = m_3 a_3$ *."*

Pour ceux là, il n'y a aucune ambigüité: il existe bien une force de frottement qui s'exerce sur le bloc passif et c'est elle, et elle seule, qui explique son mouvement.

Au total, il est possible de regrouper les argumentations des étudiants en trois catégories:

- ceux qui expliquent clairement que la force de frottement appliquée sur le bloc passif est responsable de son mouvement: ils ne rentrent pas dans la catégorie de ceux qui raisonnent en termes d'entraînement, au sens où nous l'avons défini.

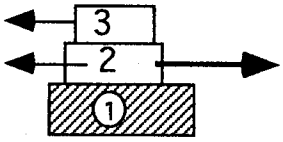
- ceux qui expliquent le mouvement du bloc passif par un entraînement de ce bloc par le bloc moteur, entraînement expliqué par la seule existence d'un frottement qui lie les blocs (et non d'une force de frottement capable de provoquer le mouvement de ce bloc dans le sens de cette force) et complété par quelques uns par le transfert de la force $\vec{F}$ sur les blocs passifs, à cause de ce même frottement. Tout se passe comme si l'existence d'un frottement entre deux surfaces revenait à l'existence d'un lien entre les deux surfaces concernées, lien qui permet aux objets d'adhérer les uns aux autres de telle sorte que les objets passifs puissent se déplacer sans l'intervention explicite d'une force s'exerçant sur eux. Avec ce type de raisonnement, les étudiants font l'économie du concept de force comme s'il ne s'appliquait pas ou n'était pas nécessaire.

- ceux enfin qui donnent des justifications que ne relèvent pas de notre classification, ou qui ne fournissent aucune justification.

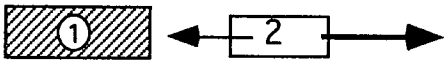
2-4-8- Coexistence des deux effets: entraînement et dessus-dessous

Nous avions déjà constaté, avec le questionnaire A, que ces deux effets coexistaient dans les justifications des étudiants, dès lors que l'on s'interessait au mouvement du bloc inférieur. Les deux effets peuvent être mentionnés dans la même question, mais aussi dans deux questions différentes. En effet, dans le questionnaire des trois blocs, l'effet DD peut apparaître à l'occasion des questions 2 et 4: or, nous avons constaté que, pour le même étudiant, l'effet DD pouvait être explicité dans l'une des questions et l'effet d'entraînement dans l'autre. Ainsi la coexistence des deux effets se manifeste dans ce questionnaire de deux façons différentes que nous allons illustrer maintenant:

- ils apparaissent dans la même question:



" Sur le bloc (1) agissent trois forces: le poids, la normale et $\vec{F}$. Comme le bloc (1) est en contact avec le bloc (2), il s'exercera sur le bloc (1) une force identique à la force $\vec{F}$ exercée sur le bloc (2). Le bloc (1) va donc se déplacer à cause de la force $\vec{F}$ et du contact entre (1) et (2)."

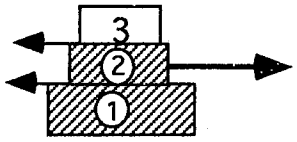


"(1) se déplace vers la droite parce que le frottement sur m_1 est nul, donc il n'y a pas de résistance au mouvement. Le frottement entre m_1 et m_2 fait que le bloc se déplace selon le déplacement de (2)."

"(1) se déplace dans le même sens que celui de $\vec{F}$ parce qu'il n'y a pas de force sur ce bloc puisque le frottement table/m_1 = 0. Comme le bloc (2) se déplace, (1) suit (2), à cause du frottement entre (1) et (2)."

Pour ces étudiants (15% du total des étudiants interrogés), l'existence du frottement entre les blocs suffit à justifier le déplacement du bloc passif par entraînement par le bloc moteur (effet d'entraînement) et sans qu'aucune force n'agisse sur lui (effet DD).

- ils apparaissent dans deux questions différentes

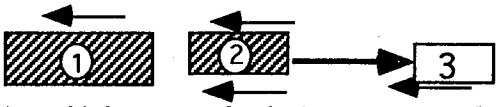


Q2: "*Le bloc (1) se déplace par rapport à la table parce qu'il est entraîné par le déplacement du bloc (2) où s'applique la force* $\vec{F}$*, à cause des frottements entre (1) et (2).*" (effet d'entraînement)
Q4: "*Si on augmente les frottements entre les blocs (2) et (3), seulement le mouvement de (3) sera modifié. Le mouvement du bloc (2) reste inchangé parce que ce bloc est seulement soumis à la force* $\vec{F}$ *et aux frottements entre (1) et (2) qui sont les mêmes.*" (effet DD)

ou bien:

Q2: "*Le bloc (1) se déplace dans le sens de la force* $\vec{F}$ *parce que le frottement table/m1 = 0 et le frottement entre ce bloc et le bloc (2) fait que (1) le suit.*" (effet d'entraînement)

Q4: "*L'accélération de (2) n'est pas modifiée avec l'augmentation du frottement entre (2) et (3). Elle serait modifiée si on augmentait le frottement entre m2 et m1. Cependant l'accélération de (3) sera modifiée.*" (effet DD)



Q2: " *(1) se déplace vers la droite parce que le frottement table/m1 = 0 et la force de frottement entre m1 et m2 va tirer le bloc m1 dans le même sens que celui de* $\vec{F}$ " .(effet d'entraînement)
Q4: " *L'accélération du bloc (2) ne changera pas parce que c'est seulement la force* $\vec{F}$ *qui détermine l'accélération de ce bloc. Par contre, l'accélération de 3 va augmenter car l'adhérence provoquée par l'augmentation du frottement sera plus grande et le corps sera donc tiré avec une intensité plus grande.*" (effet DD)

Ces étudiants ne disent pas que la force de frottement dessinée n'a aucun effet sur le mouvement du bloc 1 (question 2), mais déclarent tout de même que ce qui compte c'est le frottement entre ce bloc et la table, comme si effectivement le frottement entre ce bloc 1 et celui du dessus n'avait aucune influence sur son mouvement: seul, le "frottement" suffit à justifier le mouvement du bloc passif. La dernière citation est très claire, de ce point de vue: bien que la force de frottement dessinée soit en sens contraire à celui du mouvement du bloc 1, cette force est capable de "*tirer*" le bloc passif. Notons que cet étudiant parle, non pas de la force qui s'exerce sur le bloc 1, mais de la force de frottement *entre* les blocs. Ainsi, la confusion entre frottement et force de frottement

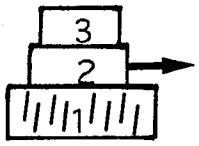
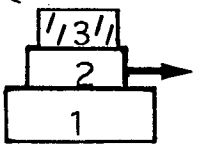
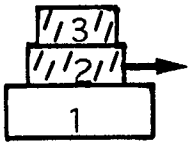
permet de dire qu'il existe une adhérence entre les surfaces, qui permet l'entraînement du bloc passif et qui résiste au mouvement.

Les deux effets peuvent ainsi coexister chez le même étudiant, soit à l'occasion d'une même question, soit lors de questions différentes. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point.

2-4-9- Résumé des résultats: effets DD et d'entraînement

Nous avons regroupé les différentes justifications fournies par les étudiants pour chacune des questions de ces questionnaires dans le tableau suivant. Comme les étudiants peuvent mentionner, lors d'une même question, les deux effets lorsqu'il s'agit des blocs passifs inférieurs, la somme des pourcentages d'une même colonne, pour la question 2, dépasse 100%.

Tableau 17: Classement des justifications

	Justifications	France, Brésil N = 139	Espagne N = 48	Total N = 187
Question 2 	ni effet DD, ni d'entraînement	20%	35,5%	24%
	effet d'entraînement	54%	33,5%	**49%**
	effet DD	29,5%	23%	28%
	inclassable	11,5%	21%	14%
Question 3 	ni effet DD, ni d'entraînement	18%	33,5%	22%
	effet d' entraînement	62%	39,5%	**56%**
	inclassable	20%	27%	22%
Question 4 	ni effet DD, ni d'entraînement	12,5%	29%	16,5%
	effet d'entraînement	32,5%	0%	**24%**
	effet DD	36,5%	52%	40,5%
	inclassable	18,5%	19%	19%

Pour une minorité d'étudiants (pas plus de 24% à la question 2 et 16,5% à la question 4), il existe une force de frottement qui s'exerce sur le bloc passif et qui explique le mouvement de ce dernier. Pour le reste des étudiants interrogés, l'effet majoritairement explicité est l'effet d'entraînement, pour la question 2, et l'effet DD pour la question 4.

Dans la dernière colonne du tableau et la troisième ligne, on peut lire que 28% de la population interrogée mentionne, lors de la question 2, l'effet DD. Ce pourcentage est décomposé ensuite en deux (13% +15%), ce qui signifie que 13% des étudiants ne mentionnent que l'effet DD et que les 15% mentionnent les deux effets, effets qui coexistent ainsi dans la même justification.

Avec la question 3, qui concerne le mouvement du bloc du dessus (3), il est impossible de trouver un effet DD. En revanche, c'est la situation adaptée pour voir fleurir l'effet d'entraînement: 56% des étudiants mentionnent effectivement cet effet.

La dernière question (question portant sur le mouvement du bloc du dessous), permet de faire émerger l'effet DD: 40,5% des étudiants le mentionnent explicitement.

L'ensemble de ces résultats indique que les deux effets peuvent être exprimés par la même personne à deux questions différentes.

En résumé, nous avons constaté que :

- une minorité d'étudiants considère que la force de frottement cinétique peut rendre compte du mouvement d'un bloc passif dans le sens de cette force, et donc jouer le rôle d'une force motrice pour ce bloc.
- une majorité d'étudiants mentionne l'effet d'entraînement quand il s'agit d'expliquer le mouvement d'un bloc passif.
- selon la question posée, les étudiants peuvent, pour les blocs passifs, faire intervenir l'effet DD. Ainsi, nous avons vu que les deux effets peuvent coexister à l'intérieur d'une réponse à une seule question ou des réponses à deux questions différentes.

2-4-10- Force de frottement et phénomène de frottement

Au niveau du langage, les termes "frottement" et "force de frottement" sont souvent utilisés l'un pour l'autre. En effet, nous rencontrons:

"...le frottement entre (1) et (2) n'agit pas sur (1)".

" il se déplace vers la droite parce que le frottement sur m1"...

"...Le bloc va donc se déplacer à cause de $\vec{F}$ exercée sur (2) et du contact entre 1 et 2 ".

" Les forces sur m3 sont le frottement entre (2) et (3),..."

" La force qui peut avoir des conséquences sur le mouvement, c'est le frottement sol/m1..."

2-4-11- Conclusion

Les résultats obtenus avec ces questionnaires confirment largement ce que nous avions déjà observé avec les questionnaires A, tout en affinant certains d'entre eux. Nous

reviendrons sur tous ces aspects au chapitre suivant où sera abordée la synthèse de l'ensemble des résultats.

3 - Questionnaire D (voiture) : frottement statique

Pour tester l'hypothèse que, pour la majorité des étudiants, le sens d'une force de frottement statique agissant sur un solide dépend essentiellement du sens du mouvement effectif de ce solide, en étant toujours opposé à ce mouvement, et que cette force n'a donc pas, pour les étudiants, la faculté de s'adapter aux conditions dynamiques en jeu, nous avons proposé aux étudiants une situation physique plus habituelle que celle de la sphère. Une voiture (avec des roues motrices à l'avant) est arrêtée sur une route horizontale. Deux situations différentes sont proposées: dans un cas, le conducteur monte dans sa voiture, met le contact et démarre, dans l'autre cas, la voiture est en panne et le conducteur la pousse. Pour chacune de ces situations physiques, les surfaces en contact sont identiques et la voiture se déplace, par rapport à la route, dans le même sens. En revanche, les tension locales au contact diffèrent d'un cas à l'autre, puisque les conditions dynamiques sont différentes dans les deux cas: cela implique que la force de frottement statique va s'ajuster aux différentes situations. Si notre hypothèse de départ est correcte, nous devrions observer une majorité de réponses où la force de frottement qui s'exerce sur la roue avant de la voiture est de même sens dans les deux cas.

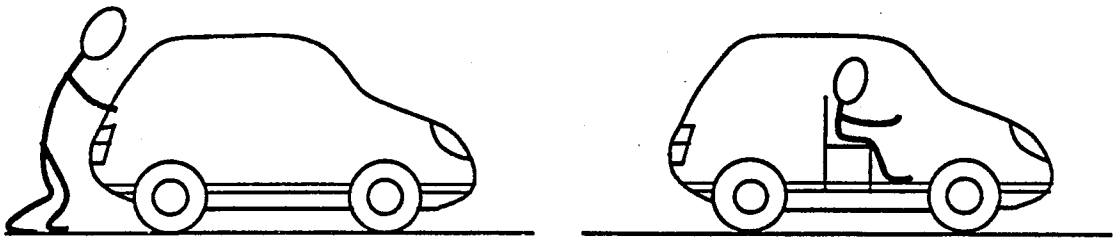
3-1- Enoncé du questionnaire

" Une voiture ayant ses roues motrices à l'avant, se trouve sur une route horizontale dont la surface est rugueuse. On veut étudier les forces en jeu dans les deux situations suivantes:

Cas A: la voiture, en panne, est poussée par son conducteur

Cas B: le conducteur entre dans la voiture en état de marche, met le contact et démarre (on supposera que les roues de la voiture roulent sans glisser).

A(voiture en panne) B (voiture en état de marche)



1) Dessiner sur chacun des schémas les forces de frottement exercées par le sol sur les roues avant de la voiture. Préciser, dans chaque cas, le sens de ces forces par rapport au sens du mouvement de la voiture. Justifier votre réponse.

2) Dessiner sur le schéma A toutes les forces qui s'exercent sur le conducteur lorsqu'il marche en poussant la voiture: préciser le sens de la force de contact par rapport au sens du mouvement du conducteur. Justifier votre réponse.

3-2- Population interrogée

124 personnes ont été interrogées qui se répartissent de la façon suivante:

- 24 étudiants de licence es sciences physiques Paris 7
- 18 étudiants de Terminale D
- 33 étudiants de 1ère année d'université Brésil
- 49 professeurs de lycée dans la région de Valencia, dont 38 en stage de formation continue

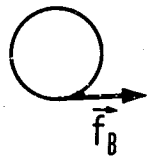
3-3- Solution de l'exercice

Là encore, pour des raisons de clarté, nous avons représenté sur la figure ci-contre un schéma éclaté des forces:

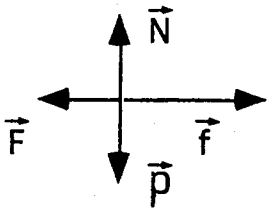
Forces de frottement sur les roues avant de la voiture

Cas A

Cas B



Forces sur le conducteur



Lorsque la voiture est en panne, la force de frottement statique que le sol exerce sur les roues de la voiture $\vec{f_A}$, est en sens contraire à celui de son mouvement par rapport au sol, alors que la force de frottement statique que le sol exerce sur les pieds du conducteur est de même sens que le mouvement du conducteur par rapport au sol. Quand la voiture est réparée, elle démarre grâce au moteur qui impose une rotation aux roues motrices: les actions exercées sur une roue sont le couple moteur, le poids et la réaction du sol. La force de frottement statique exercée sur la roue ($\vec{f_B}$) sera, dans ce cas, dans le même sens que celui du mouvement de la voiture par rapport au sol.

Dans le premier cas, comme la voiture est poussée par son conducteur, une force $\vec{F}$ est appliquée; le sens de l'éventuelle mouvement des roues (par rapport au sol) qui se produirait en absence de frottement, serait le même que celui du mouvement de translation de la voiture, puisque les roues glisseraient sans rouler. Le sens de la force de frottement statique est de sens contraire à celui de l'éventuel mouvement de glissement: elle sera

donc orientée vers la gauche et en sens contraire du mouvement de la voiture. Dans le second cas, le couple moteur impose un sens de rotation aux roues (celui des aiguilles d'une montre). En absence de frottement, les roues "patineraient" sur le sol et le sens du mouvement de glissement des roues par rapport au sol serait vers la gauche. Ainsi, le sens de la force de frottement statique, qui s'oppose à l'éventuel mouvement de glissement, sera vers la droite et donc dans le même sens que celui du mouvement de la voiture. Dans ces deux situations, les mouvements de translation de la voiture et de rotation des roues sont identiques: seules les conditions dynamiques changent. Lorsque la voiture est poussée par le conducteur, les roues auraient un mouvement de translation pure s'il n'y avait pas de frottement (en particulier, les roues ne tourneraient pas); lorsque le conducteur met le contact et démarre, les roues de la voiture tournent et continueraient à tourner, sans que la voiture n'ait de mouvement de translation s'il n'y avait pas de frottement: les tensions locales au niveau du contact sont donc très différentes d'une situation à l'autre.

Quand au conducteur, il suffit de lui appliquer le même type de raisonnement que précédemment, ce qui permet de trouver que la force que le sol exerce sur ses pieds est de même sens que celui de sa marche.

3-4 - Résultats

Nous voulons tout d'abord voir si les étudiants ont tracé des forces de frottement de même sens dans les cas A et B. Ensuite, nous examinerons les justifications fournies.

3-4-1- Sens des forces de frottement sur les roues de la voiture (cas A et B).
Les résultats sont indiqués dans le tableau 18

Tableau 18
Sens des forces de frottement sur les roues de la voiture

	Licence N = 24	Terminale D N = 18	Brésil N = 33	Espagne N = 49	Total N = 124
Forces de frottement de **même sens** dans les deux cas	92%	72,5%	76%	84%	81,5%
Forces de frottement de **sens différent** dans les deux cas	4%	16,5%	18%	8%	11,5%
Pas de réponse	4%	11%	6%	8%	7%

La grande majorité des étudiants, qui a tracé des forces de frottement de sens différent dans les deux cas (11,5% du total), a dessiné des forces de frottement correctes.

Une écrasante majorité des personnes interrogées trace des forces de frottement de même sens dans les deux cas, et ceci quelle que soit la population. Ces forces de frottement qui ont le même sens dans les deux cas peuvent être soit toutes les deux dirigées vers la droite (même sens que celui du mouvement du centre de masse), soit vers la gauche (sens contraire à celui du mouvement du centre de masse). Le tableau 19 indique la répartition entre ces deux types de réponses. Nous avons regroupé les différentes populations, puisque nous n'avons pas constaté de différences entre elles.

Tableau 19

Sens des forces de frottement, lorsqu'il est identique dans les deux cas

	Population totale N = 124	Population: forces de frottement de même sens N = 101
Sens contraire au mouvement de la voiture ⟸ ⟸	N = 69 55,5%	N = 69 68,5%
Même sens que celui de la voiture ⟹ ⟹	N = 32 26%	N = 32 31,5%

Plus de la moitié de la population totale ou plus des deux tiers de celle qui a tracé les deux forces dans le même sens a tracé des forces de frottement qui, dans chaque cas, sont en sens contraire à celui du mouvement de la voiture.

3-4-2- Etude des justifications:

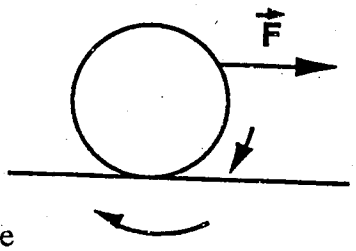
84% des étudiants qui fournissent une réponse justifient cette réponse. Examinons tout d'abord les justifications qui accompagnent chacun des types de réponses:

a) les forces de frottement ont des sens différents (11,5% de la population totale): vers la gauche dans le cas A et vers le droite dans le cas B (réponse justifiée par 78,5% des étudiants ayant donné cette réponse). On rencontre deux types de justifications différentes:

a1- Pour ces étudiants (3% de la population totale), la force de frottement s'oppose au mouvement: mouvement de translation de la voiture dans la situation A, et mouvement de rotation (au contact) des roues dans le cas B.

> " *Cas A . Les forces de frottement s'opposent au déplacement de la voiture; le sol retient la partie de la roue qui est en contact avec le sol. Cas B: dans ce cas, les forces de frottement sont dans le sens du déplacement car les*

frottements s'opposent toujours au déplacement et dans ce cas elles s'opposent au déplacement de la roue sur le sol. En effet:



déplacement de la roue

force de frottement"

"Cas A: les forces de frottement s'opposent au mouvement. Cas B: la force de frottement s'oppose au mouvement. Comme la roue tourne, la force de frottement est en sens opposé au mouvement de la roue."

"Cas A: les forces de frottement s'opposent au déplacement de la voiture. Cas B: la force s'oppose au déplacement de la roue."

Ces justifications affirment que les forces doivent s'opposer soit au déplacement de la voiture, soit au mouvement de rotation (au contact) des roues, mais n'expliquent jamais pourquoi les sens de ces forces sont différents alors que mouvement de la voiture et mouvement des roues sont identiques dans les deux situations.

a2) Les autres (5,5% de la population totale) ne déclarent pas que la force de frottement dans la situation B s'oppose à un mouvement; mais que cette force a le même sens que celui de la voiture. Pour certains d'entre eux, le rôle moteur des roues avant est déterminant et/ou la référence à un éventuel patinage des roues. Ces étudiants envisagent donc le cas où il n'y aurait pas de frottement pour déterminer le sens de la force de frottement. Nous ne sommes pas très éloignés de l'argumentation complète qui consisterait à ajouter que la force de frottement s'oppose à l'éventuelle vitesse de glissement qui se produirait en absence de frottement (2ème et 3ème citations). Certaines réponses sont, cependant, ambigües (1ère citation) car n'expliquent pas pourquoi, dans le cas des roues motrices, le sens de la force de frottement est vers l'avant et, dans l'autre cas, vers l'arrière.

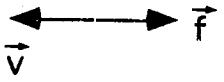
"Les cailloux sont projetés dans le sens des forces de frottement: ils sont projetés vers l'arrière (cas A), mais en avant (cas B) car les roues avant sont motrices."

"Cas A: les roues ne sont pas motrices: frottement en sens inverse de la marche de la roue. Cas B: les roues sont motrices, les frottements sont vers l'avant, car sinon les roues patineraient s'il n'y avait pas frottement."

" Cas A: pas de patinage car le conducteur pousse. Cas B: la roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Donc, pour que la roue ne patine pas, il faut que $\vec{f}$ soit de sens identique à celui de la marche de la voiture."

b) les forces de frottement sont toutes deux dirigées vers la droite (26% de la population totale): elles sont donc dans le même sens que celui du mouvement de la voiture. On trouve presque autant d'étudiants qui justifient leur réponse que d'étudiants qui ne la justifie pas (14% de la population totale justifient ce type de réponse). En revanche, la totalité des justifications fournies mentionne le fait que la force de frottement s'oppose, dans chaque cas, au mouvement de rotation la roue de la voiture. Ainsi:

" Les forces de frottement s'opposent à la vitesse des roues dans les deux cas.



" Les forces de frottement s'opposent au glissement donc ont pour effet d'inverser le sens de la rotation de la roue sur le sol."

"Les forces de frottement s'opposent au mouvement de rotation des roues."

"La roue exerce une force vers la gauche donc la force de frottement est contraire au mouvement."

" Les forces de frottement s'opposent au déplacement de la roue."

"Quelque soit la façon dont la voiture avance, les frottements sont les mêmes en direction et sens: opposés au mouvement."

Notons que les étudiants qui ont dessiné des forces de frottement de sens différent dans les deux cas (catégorie a1) ou des forces dirigées, dans chaque cas, dans le sens du mouvement (catégorie b) ont justifié leur réponse en indiquant que la force de frottement **s'opposait au** mouvement considéré. De ce point de vue, ces justifications rejoignent celles fournies par les étudiants qui dessinent des forces de frottement dirigées dans chaque cas en sens contraire de celui du mouvement de translation de la voiture (catégorie suivante: c).

c) Les forces de frottement sont toutes deux dirigées vers la gauche (55,5% du total). Les justifications se ressemblent toutes: les forces de frottement s'opposent toujours au mouvement de la voiture.

"Les forces de frottement s'opposent au sens du mouvement indépendammment du fait d'être le conducteur qui pousse la voiture (cas A)

ou pas (cas B). Tout simplement, la route va exercer une opposition sur les roues puisqu'elle est rugueuse."

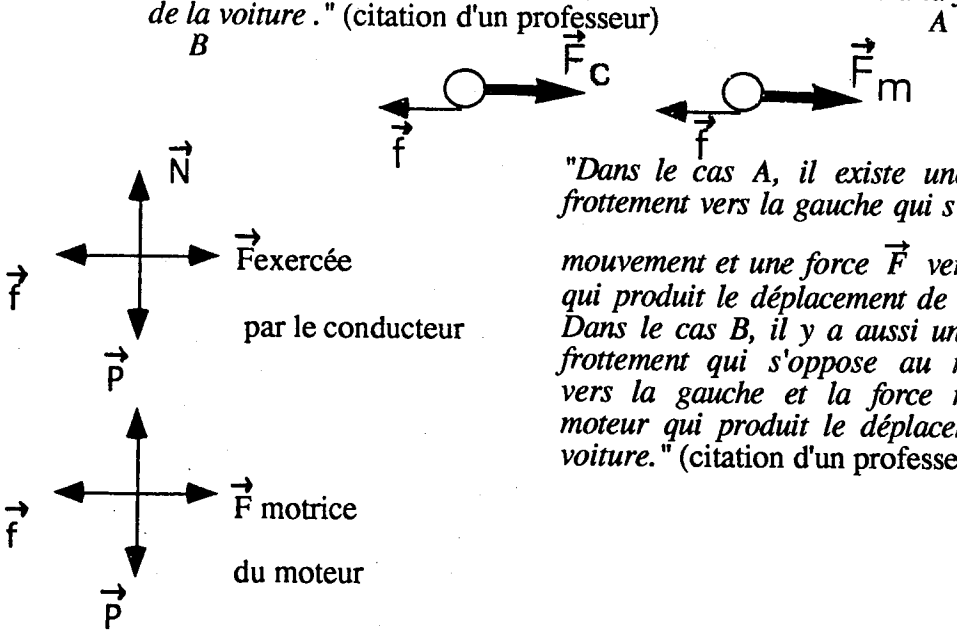
"Si la voiture est en panne ou en état de marche, les forces de frottement seront identiques dans le cas où la voiture doit avancer dans la même direction et le même sens. Les forces de frottement s'opposent au déplacement, donc elles sont en sens opposé au mouvement de la voiture;"

" Les forces de frottement freinent le mouvement: elles sont donc en sens inverse du mouvement dans les deux cas."

"Les forces de frottement sont des forces résistantes. Leur sens est donc opposé à celui du mouvement."

"Dans les deux cas, les forces de frottement sont opposées au mouvement parce que sinon la voiture serait toujours en mouvement."

"La force de frottement a le sens contraire à la force appliquée par le conducteur (cas A) et dans le cas B, elle est aussi contraire à la force motrice de la voiture ." (citation d'un professeur)



"Dans le cas A, il existe une force de frottement vers la gauche qui s'oppose au mouvement et une force $\vec{F}$ vers la droite qui produit le déplacement de la voiture. Dans le cas B, il y a aussi une force de frottement qui s'oppose au mouvement vers la gauche et la force motrice du moteur qui produit le déplacement de la voiture." (citation d'un professeur)

" Dans chaque cas, le sens des forces de frottement est opposé au sens du mouvement de la voiture car nous sommes sur une route horizontale dont la surface est rugueuse, donc cette force s'opposera à celle qui fait avancer la voiture."

Comme on le constate, toutes les argumentations de cette catégorie ont un point commun: la force de frottement statique **s'oppose au** mouvement de la voiture. Certaines (29% des justifications de cette catégorie) attribuent à "*la force du moteur*" ou à la "*force motrice du moteur*" la cause du déplacement de la voiture par opposition à la force de frottement qui "*freine*" .

En conclusion, à part les étudiants de la catégorie a_2, nous constatons que, quelque soit le sens dans lequel les étudiants des catégories a_1 et b dessinent la force de frottement (même sens ou en sens contraire du mouvement de la voiture), ils justifient

leurs réponses en terme d'opposition de la force de frottement statique au mouvement considéré. Ainsi, ces justifications rejoignent celles que l'on trouve dans la catégorie c où les forces de frottement sont dessinées en sens contraire du mouvement de la voiture. Au total on trouve presque trois étudiants sur quatre qui expliquent, à un moment donné, que la force de frottement **s'oppose** toujours au **mouvement** de translation de la voiture ou de rotation des roues. Nous avons regroupé ces résultats dans le tableau 20.

Tableau 20
Nature des justifications

Population	Force **s'oppose au mouvement**	Force **ne s'oppose pas au** mouvement	aucune justification ou aucune réponse
N = 124	72,5%	5,5%	22%

Nous constatons ainsi que plus des deux tiers des étudiants expliquent qu'une force de frottement (statique) s'oppose toujours au mouvement (soit au mouvement de rotation, soit au mouvement de translation des solides), et ceci quelle que soit le type de schéma de forces dessiné dans chacun des deux cas.

Enfin, 81,5% des étudiants dessinent les forces de frottement dans le même sens dans les deux cas. Cela signifie que, pour ces étudiants, une force de frottement (statique) a toujours un sens fixe (toujours opposé au mouvement effectif ("vrai") du solide, c'est à dire, soit au mouvement de translation, soit à celui de rotation au contact) et n'a donc pas un caractère "imprévisible" en s'adaptant aux conditions dynamiques de chacune des situations physiques. Ces résultats confirment les résultats obtenus avec le questionnaire de la sphère, ainsi que les conclusions dégagées à cette occasion.

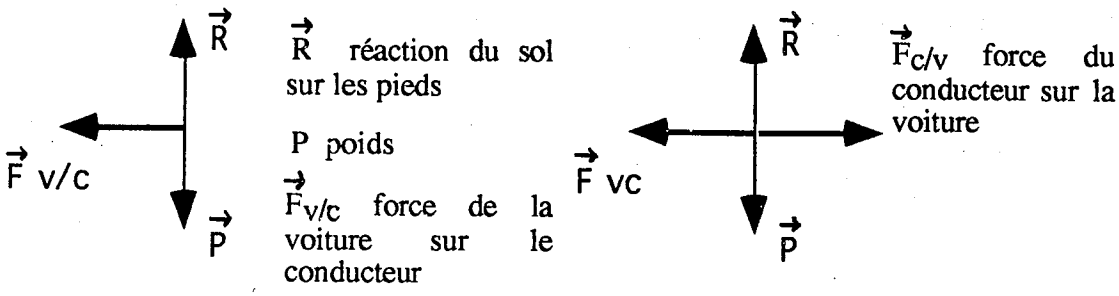
3-4-3- Sens de la force de frottement s'exerçant sur le conducteur qui marche (question 2).

Les résultats sont réunis dans le tableau 21.

Tableau 21
Sens de la force de frottement par rapport au sens de la marche

force de frottement en sens contraire du mouvement	force de même sens	pas de force dessinée	pas de réponse	total
N = 65 52,5%	N = 28 22,5%	N = 21 17%	N = 10 8%	N = 124

La majorité des étudiants trace une force de frottement de sens opposé au sens de la marche. Seulement un cinquième des étudiants trace une force de frottement dans le sens de la marche. Les étudiants (troisième colonne) qui ne tracent aucune force de frottement font les schémas suivants:



schémas dans lesquels la seule force horizontale de contact qui s'exerce sur le bonhomme est celle que la voiture exerce sur lui. Un étudiant mentionne une force dirigée dans le sens de la marche:"*la force que l'homme fait en marchant*", c'est à dire ce que nous avons l'habitude d'appeler la force motrice du bonhomme. Parmi les étudiants (la majorité) qui ont tracé une force de frottement en sens contraire de la marche, les justifications sont encore de même nature: cette force de frottement s'oppose au mouvement ou au déplacement du mobile considéré. Notons, cependant que nous en trouvons quelques uns qui disent que : "*les forces de frottement s'opposent à l'effort du bonhomme.*" On retrouve ici cette idée que l'effort est moteur.

Les justifications fournies par ceux qui ont tracé une force de frottement (22,5% du total de la population) dans le même sens que celui de la marche sont très peu nombreuses et assez diverses:

- il est exceptionnel de trouver une justification qui interprète la force de frottement comme étant la résultante des forces qui fait avancer le marcheur " *pour que le bonhomme avance, il faut que f. de la voiture sur H < force de la terre sur H*.

- les autres déclarent soit : "*les frottements aux pieds qui empêchent l'homme de partir en arrière*" , soit: "*les frottements qui permettent de garder les pieds sur le sol*". Il est extrêmement difficile d'interpréter ces justifications, bien qu'il y ait une différence sensible entre les deux. En effet, la première mentionne non pas que l'homme patinerait ou ferait du sur-place; mais que les frottements l'empêchent de partir en arrière, ce qui peut laisser penser que cet étudiant raisonne en terme d'éventuelle vitesse de glissement; mais ce n'est absolument pas certain; le second, en revanche, ne mentionne rien de tout cela; sa réponse peut être comprise comme étant un fait de la vie quotidienne. Les justifications fournies ne sont pas suffisamment précises pour pouvoir les classer de façon fine; si nous voulons en savoir plus, il s'impose de poser d'autres questions.

3-4-4- Force de frottement et phénomène de frottement

Le phénomène de frottement existant entre deux surfaces en contact n'est pas toujours clairement différencié de la force de frottement qui s'exerce sur les surfaces en contact. On retrouve ici très fréquemment le fait que les étudiants utilisent indifféremment les termes de frottement et de force de frottement.

" *Les roues ne sont pas motrices: frottements en sens inverse de.... les roues sont motrices, les frottements sont vers l'avant...* "

" *...les frottements exercés sur les roues seront toujours opposés au...* "

" *La force de frottement entre les roues et...* "

Les frottements ont un sens, ils s'exercent sur un objet et la force de frottement s'exerce entre...Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre suivant.

3-5- Conclusion

Nous avons trouvé dans ces questionnaires des confirmations des hypothèses faites au début. Les résultats quantitatifs indiqués sont suffisamment clairs, ainsi que l'étude des justifications fournies. Il nous faut maintenant tenter de faire une synthèse de l'ensemble de ces résultats en proposant un modèle étudiant concernant le frottement solide, c'est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE V
LES FROTTEMENTS SOLIDES VUS PAR LES ETUDIANTS

Avant de proposer un modèle sur le frottement solide vu par les étudiants, nous allons rappeler les principaux résultats obtenus, c'est à dire ceux pour lesquels les pourcentages obtenus sont les plus importants. Nous en profiterons pour les confronter aux hypothèses qui ont été explicitées au chapitre III. Rappelons ces hypothèses.

Pour la majorité des étudiants

H1: Les forces de frottement cinétique (cas du glissement) qui s'exercent sur deux solides en contact s'opposent toujours aux mouvements des solides concernés (sans aucune référence aux mouvements de glissement relatifs entre eux).

H2 : Les forces de frottement statique (cas du non glissement) qui s'exercent sur deux solides en contact n'ont pas la caractéristique de s'adapter aux différentes situations physiques en fonction des autres forces en jeu: ces forces ont toujours un sens bien défini déterminé par le sens du mouvement donné des solides;

H3: Les forces de frottement statique qui s'exercent sur deux solides en contact s'opposent toujours au mouvement donné (effectif) des solides concernés .

H4: La loi des actions réciproques n'est pas appliquée dans l'étude du mouvement de deux (ou plus) solides en contact: les actions de contact entre les solides sont réduites à une seule composante tangentielle et à une seule composante normale aux surfaces en contact.

H5: Les composantes horizontale et verticale de la résultante des actions de contact entre les solides n'agissent pas sur le solide qui se trouve en dessous de l'autre solide avec lequel il est en contact.

H6: La localisation des forces de frottement exercées sur deux solides en contact ne permet pas de savoir de façon précise sur quel solide s'exerce chaque force de frottement: les forces de frottement s'exercent "entre" les solides et non sur chacun d'entre eux.

H7: Les forces de frottement ne sont pas nettement distinguées du phénomène de frottement: le frottement existant entre deux solides en contact

est considéré comme étant la force qui s'exerce sur le solide étudié (ou vice-versa).

Nous terminerons ce chapitre en dégageant les caractéristiques des raisonnements des étudiants sur les frottements solides.

1- Résumé des principaux résultats:

1-1- Frottement cinétique

a) Pour les étudiants et les enseignants du secondaire interrogés, les forces de contact horizontales et verticales sont de façon majoritaire **solitaires,** comme le rappelle le tableau 22, ce qui confirme l'hypothèse H4.

Tableau 22
Nature des forces de contact (solitaires ou mariées)

	Forces. de contact horizontales			Forces de. contact verticales		
	Solitaires	mariées	rien	solitaires	mariées	rien
Quest A (2 blocs) N = 255	68,5%	31,5%	0%	85%	11,5%	3,5%
Quest. C (3 blocs) N = 187	57,5%	31,5%	11%	72%	13%	12%
Total (N = 442)	**63,5%**	31,5%	5%	**79,5%**	12%	8,5%

Le fait qu'aucun étudiant ne trace de force de contact verticale solitaire dans le sens du dessus vers le dessous confirme une partie de l'hypothèse H5, celle qui concerne la composante verticale des forces de contact.

b) la composante horizontale des forces de contact (force de frottement)est majoritairement tracée à **l'interface des surfaces en contact,** comme l'indique le tableau 23, ce qui confirme l'hypothèse H6.

Tableau 23
Localisation des forces de frottement

	Quest A (2 blocs) N = 255	Quest C (3 blocs) N = 187	Total N = 442
à l'interface des blocs	**66,5 %**	**53,5 %**	**61 %**
sur le bloc du desssus	22,5%	16%	19,5%
sur le bloc du dessous	0%	0,5%	0,5%
sur chaque bloc (f. mariées)	5,5%	18,5%	11%
aucun dessin	5,5%	11,5%	8%

Le fait que seulement deux étudiants localisent la force de frottement sur le bloc du dessous est un élément qui contribue à la confirmation de l'hypothèse H_5.

c) les **forces horizontales solitaires** (forces de frottement) sont en majorité tracées **en sens contraire** du sens de la **force appliquée** $\vec{F}$, comme l'indique le tableau 24, ce qui est un élément de confirmation de l'hypothèse H_1.

Tableau 24
Sens des forces de frottement solitaires

	Qu. A (2 blocs) N = 255	Qu.C (3 blocs) N = 187	Total N = 442	% du total des forces solitaires N = 281
Force vers la gauche, de sens contraire à $\vec{F}$	53,5%	46%	50%	**79 %**
Force vers la droite, de même sens que $\vec{F}$	15%	8%	12%	19%

d) l'hypothèse H_5 a été confirmée par les résultats et les justifications fournies par les étudiants que nous avons regroupés sous la rubrique "effet dessus-dessous" ou effet DD. Rappelons auparavant deux éléments qui contribuent à la confirmation de l'hypothèse H_5: aucun n'étudiant ne trace de force de contact verticale solitaire dans le sens du dessus vers le dessous (hypothèse H_4) et seulement deux étudiants localisent la force de frottement sur le bloc du dessous, les autres étudiants la localisant à l'interface (hypothèse H_6). De façon plus générale, l'existence d'un coefficient de frottement entre deux surfaces conduit, en effet, un certain nombre

d'etudiants à penser que ce frottement n'a d'effet que sur le bloc qui se trouve au-dessus des surfaces en contact. Nous avons constaté cet effet lors de plusieurs questions des questionnaires A et C, c'est à dire les questionnaires avec des blocs. Cependant, cet effet se manifeste de façon plus explicite lors des questions 2 et 4. Le tableau 25 résume les résultats obtenus, pour ces deux questions. Rappelons que la question 4 demandait quel(s) mouvement(s) étai(en)t modifié(s) lorsqu'on modifiait le coefficient de frottement entre les deux solides.

Tableau 25
Effet DD

	Question 2			Question 4		
	QA 2blocs N = 255	QC 3blocs N = 187	Total N= 442	QA 2blocs N= 69	Q C 3blocs N= 187	Total N=256
Effet DD	38%	28%	**34%**	56,5%	40,5%	**45%**

e) le dernier résultat important concerne ce que nous avons appelé l'effet d'entraînement. Nous avons en effet constaté que bon nombre d'étudiants pense que le bloc "passif" (celui sur lequel la force $\vec{F}$ n'est pas appliquée) est entraîné par le bloc moteur (celui sur lequel la force $\vec{F}$ est appliquée) sans que ne s'exerce explicitement sur le bloc passif une force dans le sens du mouvement. Certains étudiants précisent que le frottement a pour effet de transférer cette force $\vec{F}$ sur le bloc passif soit directement, soit à l'aide "*d'un pont de transmission*". Le tableau 26 regroupe les résultats qui concernent le bloc passif lorsqu'il se trouve "dessous" l'interface où il y a frottement (questionnaire A_2 et une question du questionnaire C) et lorsqu'il se trouve "dessus" (questionnaire A_1 et une autre question du questionnaire C).

Tableau 26
Effet d'entraînement (effet E) sur le bloc "passif" du desssous et du dessus

	Question sur le bloc passif du dessous			Question sur le bloc passif du dessus		
	A_2 2blocs N = 255	C 3blocs N = 187	Total N= 442	A_1 2blocs N= 105	C 3blocs N= 187	Total N=292
Effet E	57,5%	49%	**54%**	48,5%	56%	**53,5%**
Pas d'effet E	26%	24%	25%	29,5%	22%	24,5%
Réponse inclassable	12%	14%	13%	22%	22%	22%

La somme des pourcentages de chaque colonne correspondant aux questions portant sur le bloc passif inférieur est inférieure à 100%, car certaines réponses ne mentionnent que l'effet DD, sans aucune mention à un quelconque entraînement ou non entraînement.

1-2- Frottements cinétique et statique (résultats communs)

La **force de frottement** (statique et/ou cinétique) est, pour la majorité des gens interrogés, une **force qui a un sens bien défini: elle s'oppose toujours au mouvement effectif du** solide considéré (sans référence au mouvement relatif des surfaces en contact ou à l'éventuelle mouvement relatif des surfaces de contact qui existerait en absence de frottement), comme le résume les tableaux 27 et 28, ce qui confirme respectivement les hypothèses H_1 et H_3. Ces hypothèses ont été explicitement testées avec les deux questionnaires sur le frottement cinétique et les deux questionnaires sur le frottement statique.

Le tableau 27 regroupe les réponses obtenues avec les questionnaires A_1 (deux blocs) et C (trois blocs) lorsqu'on s'intéresse au sens de la force de frottement cinétique par rapport au sens du mouvement du bloc "passif" supérieur, c'est à dire celui qui est au dessus et sur lequel l'expérimentateur n'exerce aucune force. Nous ne donnons pas ici les résultats concernant le bloc du dessous, car ils sont perturbés par l'effet DD. Rappelons que, pour les situations étudiées ici, le sens de la force de frottement est obtenu en cherchant le mouvement relatif d'un bloc par rapport à l'autre; la force s'exerçant sur le bloc i étant de sens opposé à celui de la vitesse relative de glissement c'est à dire celle du bloc i par rapport au bloc j.

Tableau 27

Frottement cinétique: sens de la force de frottement par rapport au mouvement du bloc passif supérieur.

(Questionnaires A_1 et C)

	Etudiants			Professeurs
	A_1 (2 blocs) N = 105	C(3 blocs) N = 139	Total N = 244	C (3 blocs) N = 48
F. frottement s'oppose au mouvement	68%	53,5%	**59,5%**	39,5%
F. frottement peut être de même sens que celui du mouvement	29,5%	23%	26%	29%
aucune réponse ou réponse inclassable	2,5%	23,5%	14,5%	31,5%

Le tableau 28 regroupe les réponses fournies aux questions des questionnaires B (mouvement d'une sphère) et D (déplacement d'une voiture) qui concernent le sens de la force de frottement statique par rapport à celui du mouvement du mobile étudié, quelque soit le mouvement considéré par l'étudiant: le mouvement de rotation (au contact)de la sphère ou des roues de la voiture ou le mouvement de translation de la sphère ou de la voiture. Rappelons que les situations étudiées ici sont des situations de roulement sans glissement: le sens de la force de frottement s'obtient alors en cherchant le sens de l'éventuelle vitesse de glissement qui existerait en absence de frottement.

Tableau 28

Frottement statique: sens de la force de frottement par rapport au sens du mouvement donné du solide étudié

Questionnaires B et D

	Quest B (sphère) N = 48	Quest D(voiture) N = 124		Total N = 172
		Etudiants	Professeurs	
F. frottement s'oppose au mouvement	81,5%	80%	84%	**81,5%**
F. frottement de même sens que le mouvement	0%	13,5%	8%	8%
aucune réponse ou réponse inclassable	18,5%	6,5%	8%	10,5%

Dans le cas du questionnaire de la sphère, les étudiants ont toujours considéré que le sens de la force de frottement statique ne pouvait pas changer et que ce sens était toujours opposé à celui du mouvement donné de la sphère. Dans le cas de la voiture, les étudiants qui ont traçé, dans les deux situations physiques étudiées (voiture en panne et en état de marche), des forces de frottement de même sens ont considéré que le sens de cette force ne pouvait pas changer avec la situation physique car le sens de déplacement de l'objet considéré restait le même d'une situation à l'autre et que ce sens était forcément opposé à celui du mouvement effectif considéré. En revanche, les étudiants qui ont tracé des forces de sens différents dans les deux cas admettent que le sens de cette force peut varier selon les différentes situations physiques et qu'il peut parfois être le même que celui du mouvement effectif. Ainsi, les hypothèses H_2 et H_3 sont toutes les deux confirmées: les forces de frottement statique sont toujours orientées selon un sens bien défini (elles ne s'adaptent pas) et ce sens est toujours celui qui s'oppose à celui du mouvement donné (sans, là encore, aucune référence à l'éventuel mouvement de glissement relatif des surfaces en contact en absence de frottement).

1-3- Frottement statique

Il est possible de regarder les résultats précédents, qui concernent uniquement le frottement statique, sous un angle différent c'est à dire celui du sens de cette force: pour un mouvement de solide donné, le sens de cette force de frottement est-il toujours parfaitement défini ou peut-il changer selon les forces en jeu ? C'est ce qui a été mis en évidence dans le tableau 29, où nous avons réuni les réponses fournies par les étudiants et les professeurs.

Tableau 29
Frottement statique: sens de la force de frottement
Questionnaires B et D

	Quest B (sphère) N = 48	Quest D (voiture) N = 124	Total N = 172
Sens de f bien défini: toujours le même	81,5%	81,5	**81,5%**
Sens de f peut changer	0%	11,5%	8%
pas de réponse	18,5%	7%	10,5%

Ce tableau n'appelle aucun commentaire, il se suffit à lui-même. Maintenant, avant de proposer le modèle étudiant du frottement solide, nous allons rapidement discuter l'ensembles des résultats.

2- Discussion des résultats.

2-1- Frottement cinétique

a) Pour la majorité des étudiants, il n'existe qu'une force de frottement unique pour un couple de solides en contact.. C'est ce qu'expriment les étudiants quand ils parlent de LA force de frottement:

*" La force de frottement s'**applique** entre les blocs"*
*"La force de frottement qui **surgit** entre les blocs"*
*" c'est la force de frottement **entre** les blocs"*
*"il y a **une** force de frottement **entre** eux" "*
*"la force de frottement sur ce bloc est celle qui **existe** entre S_1 et S_2 "*

" *La force de frottement est* ***uniquement créée entre*** *m_1 et m_2*"

Cette force unique est, pour la majorité des étudiants, localisée à l'interface, comme l'indiquent clairement les schémas de forces. Cependant, cette localisation à l'interface se manifeste aussi à travers le langage utilisé puisque les étudiants parlent de "*la force qui s'exerce* ***entre*** *les blocs*".

Cette force unique n'agit que sur l'un des solides en jeu et n'agit pas en même temps sur les deux solides en contact. Le solide sur lequel elle agit se trouve toujours au dessus de la surface de contact où il y a frottement (c'est l'effet DD déjà de nombreuses fois mentionné). Notons, cependant que, si la plupart des étudiants trace une seule force de frottement, on en trouve un certain nombre qui trace des forces mariées; mais ce n'est pas toujours une garantie de compréhension du phénomène physique. En effet, certains déclarent explicitement que: "*cette force concerne l'interface*" des blocs, et, donc, "*elle n'influe en rien le mouvement du bloc du dessous*".

b) la loi des actions réciproques n'est pas appliquée, ou est appliquée de façon très ambigüe.

Ce résultat est en partie surprenant, même si on sait, par ailleurs (cf. Viennot, 1979,1986,1989; Ménigaux, 1986) que cette loi, pour les actions à distance, est assez mal appliquée. Lorsque des objets interagissent à distance, on oublie très souvent (y compris les manuels et les enseignants) de mentionner les deux partenaires de l'interaction car l'un des deux partenaires est en général soit très éloigné de l'autre, soit beaucoup plus massif (donc ne se déplaçant pas): de ce fait, la plupart du temps, on ne tient compte que d'une seule force, celle qui s'exerce sur l'objet que l'on étudie. Ici, avec des forces de contact, les deux partenaires en jeu (les deux solides en contact) sont très proches l'un de l'autre et il est, en théorie, difficile de ne pas tenir compte des deux partenaires. D'ailleurs, J. Ménigaux (1986) a montré que des élèves de troisième traçait, pour des forces de contact de poussée et de traction, des forces mariées tout en inversant les objets d'application de ces forces. Or, ce que nous constatons, ici, ce n'est pas l'inversion des objets d'application, mais la non prise en compte de ces actions réciproques puisque la grande majorité des étudiants trace des forces solitaires.

De la même façon, la loi des actions réciproques n'est pas davantage appliquée pour les composantes normales des forces de contact. En effet, une très grande majorité des étudiants a tracé des forces normales solitaires. De plus, ces forces normales solitaires sont orientées toujours dans le même sens: depuis le bloc du dessous vers le bloc du dessus. Ceci est compatible avec l'effet DD.

c) mouvement relatif

Pour la majorité des étudiants, la force de frottement qui s'exerce sur un solide doit toujours s'opposer au mouvement effectif ("vrai") de ce solide, le mouvement relatif entre les solides en contact n'étant jamais considéré. Ce dernier aspect n'est pas très surprenant, puisque l'on sait (Saltiel, 1978, 1992) que les étudiants ne raisonnent jamais en termes de référentiels, qu'ils ne considèrent que des mouvement "vrais" (ceux qui ont une cause dynamique identifiable) et qu'ils ne prennent jamais en compte les mouvements apparents, ceux qui sont purement "cinématiques". Or, ici, le mouvement relatif d'une surface par rapport à une autre rentre dans la catégorie des mouvements apparents et il n'est donc guère étonnant que ces mouvements ne soient pas pris en compte, puisque pour les étudiants, ils n'existent pas. De ce fait, les seuls mouvements considérés par les étudiants sont les mouvements "vrais", c'est à dire, dans les situations des questionnaires, les mouvements de chacun des solides par rapport au support (la table ou le sol).

c1- aspect résistant de la force de frottement:

La force de frottement a toujours pour fonction première de "résister" au mouvement du solide considéré (sous-entendu mouvement "vrai" de ce solide): le frottement ou la force de frottement, comme le disent les étudiants, est en effet toujours "*résistant*", "*dissipatif*", "*destructif*". D'autres précisent que "*par définition*", la force de frottement "*s'oppose au mouvement*", "*est une force de freinage*" ,"*s'oppose au mouvement car Wf est négatif*". Dans ce cadre, une force de frottement ne peut pas "créer" le mouvement d'un solide et donc exercer le rôle de force motrice du mouvement d'un solide. Cette fonction essentielle de résistance au mouvement de la force de frottement combinée avec la non prise en compte des mouvements relatifs, la non application de la loi des actions réciproques et l'effet dessus dessous a un certain nombre de conséquences:

La grande majorité des étudiants (97,5%) n'a aucun problème pour déclarer, dans la situation du questionnaire A_2 (deux blocs) où le bloc moteur est celui du dessus, que la force de frottement s'oppose au mouvement de ce bloc, car il se trouve que la force de frottement n'agit que sur le bloc supérieur et que le mouvement "vrai" de ce bloc, c'est à dire par rapport à la table, est de même sens que celui du mouvement relatif des surfaces en contact. Le problème est très différent avec la situation du questionnaire A_1 (deux blocs) où le bloc moteur est celui du dessous. Dans ce cas, la majorité des étudiants déclare cette fois que la force n'est pas opposée au mouvement de ce bloc car n'agit pas sur lui (effet DD). Un certain nombre d'étudiants, cependant, dessine des forces mariées ou des forces solitaires dans le sens du mouvement, sans pour autant déclarer que la force de frottement qui s'exerce sur le bloc passif est responsable du mouvement de ce bloc. Il est frappant de remarquer que, pour cette catégorie d'étudiants, le bloc passif peut

se déplacer dans le même sens que celui de la force de frottement sans que cette force perde son caractère résistant. En effet, ils justifient le mouvement du bloc passif en établissant un rapport de grandeur entre la norme de la force de frottement et celle de la force $\vec{F}$ exercée par l'expérimentateur: le bloc passif se déplace dans le même sens que celui de $\vec{F}$, non parce que la force de frottement est orientée dans ce sens, mais parce que la norme de cette force est "*plus grande*" que celle de la force de frottement "*entre*" les blocs ou que la force est "*plus grande que le frottement entre les blocs*". La force de frottement continue à exercer son rôle de force résistante, puisque, pour que le bloc passif puisse se déplacer, il faut que la norme de la force $\vec{F}$ soit supérieure à celle de la force de frottement. Nous allons voir maintenant comment l'effet d'entraînement permet de rendre compte de ce type de comportement.

c2 -effet d'entraînement

Cet effet apparaît lorsque les étudiants tentent d'expliquer le mouvement du bloc "passif", quelle que soit la position de celui-ci par rapport au bloc moteur (c'est à dire au dessus ou au dessous du bloc moteur), sans l'aide d'une force de frottement qui agit dans le sens du mouvement du bloc passif et qui soit déclarée être responsable de ce mouvement. Le solide passif est " *entraîné*" par le bloc moteur, car les deux solides sont "*liés*", "*restent accrochés*", "*adhèrent*" à cause du ou des frottements existant entre les solides. Ainsi, les deux solides se déplacent ensemble, c'est à dire dans le même sens, mais pas nécessairement avec la même vitesse, comme nous l'avons vu au cours de cette enquête. C'est le caractère résistant de cette force de frottement qui implique une liaison ou une "adhérence" entre les blocs et qui permet, du même coup, d'expliquer le mouvement d'entraînement dû aux frottements: dire que la force de frottement résiste au mouvement d'un objet, cela signifie que cet objet est en mouvement parce que s'il n'existait pas de frottement (qui, rappelons-le, concerne l'interface et qui sert à unir les solides), le solide passif ne pourrait pas se déplacer; c'est bien parce qu'il y a frottement que ce solide passif se déplace. La force de frottement résiste ainsi au mouvement d'entraînement créé par le frottement. Le point remarquable est qu'il n'est pas nécessaire qu'une force s'exerce explicitement sur le solide étudié pour que ce solide se déplace. Quelques étudiants considèrent que "*le frottement entre les blocs va tranférer*", sur le bloc passif, "*la force $\vec{F}$ exercée sur le bloc moteur*". C'est donc le frottement qui permet le transfert de cette force "motrice" et qui fonctionne comme "*pont de transmission*". Ce pont transmet soit la force motrice $\vec{F}$ soit le mouvement du bloc moteur, sans l'intervention d'aucune force. Pour rendre compte de cet aspect du frottement, nous utiliserons le terme de lien (plus ou moins rigide), car il nous faut exprimer le fait que les blocs adhèrent entre eux et que cette "adhérence" n'est pas totale puisque les blocs ont la possibilité de se déplacer à des vitesses différentes. Cette "adhérence" (exprimée de

nombreuses fois par les étudiants) intervient à l'occasion d'un phénomène de frottement cinétique alors qu'elle est généralement associée à des situations physiques pour lesquelles les solides en contact ne se déplacent pas l'un par rapport à l'autre, c'est à dire pour les cas statiques. Les étudiants, confrontés à une situation de glissement (frottement cinétique) utilisent un raisonnement propre à une situation statique du point de vue du glissement des surfaces en contact les unes par rapport aux autres (frottement statique) pour justifier le mouvement des solides passifs. Dans le cas (rare) où les étudiants considèrent que les blocs se déplacent ensemble avec la même vitesse (alors qu'il est écrit dans l'énoncé que les blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre) la situation de glissement est confondue avec celle de non glissement.

Cette conception du frottement est compatible avec l'effet DD. En effet, si le bloc passif est entraîné sans qu'aucune force de frottement dans le sens de son mouvement par rapport à la table ne s'exerce sur lui, la force de frottement existante a pour fonction essentielle de freiner le solide ou de résister au mouvement d'entraînement. Cette force unique agit donc sur un solide et il se trouve que c'est celui qui se trouve au dessous de l'interface où il y a frottement (coexistence des effets DD et d'entraînement).

En conclusion, le frottement cinétique est compris comme s'il existait un lien entre les surfaces en contact, lien qui assure une certaine "adhérence" entre les solides en contact et qui assure l'entraînement du solide passif par le solide moteur. Les solides se déplacent tous dans le même sens, par rapport au support, pas nécessairement à la même vitesse. Ainsi, les étudiants attribuent au frottement cinétique des caractéristiques propres au cas du frottement statique.

d) Les étudiants ne différencient pas vraiment le phénomène " frottement" de "la force de frottement".

Nous constatons que les termes de "frottement" et de "force de frottement" sont souvent utilisés indifféremment l'un pour l'autre. En effet, les étudiants écrivent que:

Le frottement agit sur,... s'exerce sur,... est en sens contraire à.... " ou bien que "*le frottement sur X est une force*", " *la force de frottement sur X..... car s'il n'y avait pas de frottement exercé sur X*".

Ici, le phénomène est nettement confondu, au niveau du langage, avec la force. Au lieu de trouver des expressions du type " la force de frottement exercée sur l'objet X" et "le frottement existant entre les objets", on trouve les expressions suivantes:

" *La force de frottement:*

- *s'applique* ***entre*** *les blocs*
- *surgit* ***entre*** *les blocs*
- *s'exerce* ***entre*** *les blocs*
- *est créée* ***entre*** *les blocs*
- *existe* ***entre*** *....* "

Certaines justifications résument à elles-seules, l'ensemble de ce qui vient d'être dit. Citons un exemple:

Un étudiant qui a dessiné des forces mariées à l'interface écrit: " *Le frottement sur (1)* (bloc du dessous) *est une force de 2 sur 1. Cette force concerne l'interface 2-1. En fait, il n'existe pas de force de frottement qui agit sur 1*". Malgré un schéma qui comporte des forces mariées, la force qui devrait s'exercer sur le bloc du dessus est déclarée n'avoir aucun effet sur lui (effet DD). Les forces de frottement sont localisées à l'interface et sont effectivement déclarées ne concerner que l'interface. L'étudiant, enfin, déclare tout net que le frottement est une force.

Ainsi, un contact avec frottement est caractérisé, pour les étudiants, par une force unique de frottement qui a pour propriété de résister au mouvement, tout comme le phénomène lui-même: l'indifférenciation frottement, force de frottement n'est sans doute pas une simple question de langage.

2- 2- Frottement statique

L'ensemble des résultats est sans ambigüité:

- une écrasante majorité d'étudiants considère que les forces de frottement statique qui s'exercent sur des solides en mouvement de roulement sans glissement ont un sens bien défini qui dépend du sens du mouvement donné du solide étudié.

- le sens attribué à cette force de frottement statique est toujours opposé à celui du mouvement effectif du solide qui roule sans glisser sur une surface donnée, le mouvement de référence considéré pouvant être aussi bien le mouvement de translation du centre de masse que celui de rotation autour du centre de masse. Par ailleurs, un nombre important d'étudiants confond un mouvement de translation pure (sans rotation) d'un solide par rapport à l'autre qui implique toujours, au niveau du contact, un glissement avec un mouvement de translation accompagné d'un mouvement de rotation qui n'implique pas toujours un tel glissement.

La force de frottement statique n'est nullement perçue comme une force "imprévisible" qui peut s'adapter aux conditions dynamiques de chaque situation physique et dont le sens n'est pas connu ou déterminé à l'aide de la donnée des mouvements effectifs des solides en présence. Les étudiants appliquent les lois du frottement de glissement cinétique au cas du frottement statique, comme s'il existait (au moins lorsque les solides en jeu sont mobiles dans un référentiel donné) un phénomène unique de frottement entre les solides en contact.

Nous avons également observé que les étudiants utilisent très souvent le terme de frottement à la place de celui de force de frottement et vice versa, comme pour le frottement cinétique.

2-3- Frottements statique et cinétique

Nous n'avons pas étudié de situations physiques de frottement statique pour lesquelles les deux solides sont, dans un référentiel donné, au repos (bateau en équilibre sur un plan incliné, par exemple) ou en mouvement de translation avec un mouvement de glissement relatif, au contact, nul. Si nous ne pouvons rien dire sur des situations où les solides étudiés sont au repos, il est possible de généraliser ce que nous avons dit pour les situations de roulement sans glissement aux cas des mouvements de translation. En effet, lors de la "phase exploratoire", les étudiants brésiliens ont eu à traiter une situation comprenant deux blocs en repos relatif, un expérimentateur exerçant une force sur l'un des blocs. Nous avons alors constaté que les étudiants confondaient le phénomène de frottement statique avec celui de frottement cinétique (cf. chapitre II): les étudiants traitaient de la même façon, en ce qui concerne le sens de la force de frottement, les deux situations physiques faisant intervenir chacune un frottement différent. Par ailleurs, nous avons constaté que les étudiants traitaient les problèmes de frottement statique comme s'il s'agissait de problèmes de frottement cinétique. Tout indique que, pour les étudiants, il n'existe qu'un type de frottement qui obéit à des lois précises:

-il n'existe qu'un type de frottement dès lors que les solides en jeu sont en mouvement relatif non nul dans un référentiel donné, avec un mouvement relatif de glissement, au contact, différent ou égal à zéro.

- il n'existe qu'une seule force de frottement, dont le sens est bien défini: il est opposé à celui du mouvement "vrai" (effectif) du solide étudié.

- cette force n'agit que sur le solide qui se trouve au dessus de la surface de contact où il y a frottement.

3- Proposition de modèle étudiant du frottement solide sec

Le modèle que nous allons expliciter maintenant permet de décrire les réponses observées et de rendre compte des grandes tendances d'ensemble. Ce modèle n'est évidemment pas explicité par les étudiants en tant que tel, mais tout se passe comme si les étudiants raisonnaient de cette façon.

3-1 Pour les étudiants, il n'existe qu'un phénomène **unique** de frottement, dès lors que les solides en présence, ayant ou non un mouvement de glissement relatif, au contact, nul, sont mobiles dans le référentiel donné. Nous ne parlerons donc par la suite que de frottement sans préciser s'il s'agit de frottement cinétique ou statique. Considérons deux solides en contact et décrivons les caractéristiques des forces de contact.

3-2 Les actions de contact exercées sur des solides en présence d'un frottement ont les propriétés suivantes:

- il existe **une** résultante **unique** des forces de contact $\vec{R}$ qui se décompose en une force de contact tangentielle $\vec{T}$, appelée force de frottement, et une force de contact $\vec{N}$ normale à la surface de contact des solides.

- cette résultante est localisée à l'interface des solides en présence.

3-3 Propriétés des forces de contact $\vec{T}$ et $\vec{N}$

- les forces de contact $\vec{T}$ et $\vec{N}$ n'agissent que sur le solide qui se trouve au dessus de la surface de contact entre les deux solides en présence.

- le sens de la force de frottement $\vec{T}$ est déterminé à partir du sens du mouvement du solide étudié: il est toujours opposé à ce mouvement (mouvement "vrai" du solide considéré), sans aucune référence à un quelconque mouvement (ou éventuel mouvement) de glissement relatif des surfaces en contact les unes par rapport aux autres.

- la norme de la force de frottement $\vec{T}$ ne dépend pas des autres forces en jeu.

3-4 Caractéristiques du phénomène frottement

- le phénomène "frottement" existant entre des solides en contact est représenté par **une force unique** de frottement qui a un sens bien défini dès lors que les mouvements effectifs ("vrais") des solides en contact sont connus: cette force s'oppose toujours au mouvement donné du solide étudié (et non au mouvement de glissement relatif dans le cas du frottement cinétique et à l'éventuel mouvement de glissement relatif en absence de frottement dans le cas du frottement statique).

- le frottement fonctionne comme s'il existait entre les solides en contact un **lien** qui assure une certaine " adhérence" entre ces solides, "adhérence" qui d'une part freine les solides et qui, d'autre part, permet au solide passif d'être entraîné par le solide moteur sans que ne s'exerce explicitement sur lui une force dans le sens du mouvement.

Ce modèle permet de rendre compte de l'ensemble des résultats observés:

- l'attribution des caractéristiques "d'adhérence" aux surfaces en contact des solides, généralement associées à des situations de non glissement, est transférée aux cas de glissement (frottement cinétique).

- les forces de frottement statique et cinétique obéissent à une loi de Coulomb aménagée dans laquelle intervient non pas le mouvement ou l'éventuel

mouvement relatif de glissement des surfaces en contact des solides les unes par rapport aux autres mais les mouvements "vrais" de chacun des solides en présence. Le sens des forces de frottement (statique ou cinétique), pour des mouvements de solides donnés, est, pour les étudiants, parfaitement défini: il est toujours opposé à celui du mouvement effectif.

- la force de frottement étant unique, les forces de contact ne sont pas mariées, comme l'indiquent les schémas de forces.

- l'effet dessus-dessous: cette force unique n'agit que sur le solide supérieur.

- effet résistif: la force de frottement ne peut pas avoir de rôle moteur, puisque cette force, pour les étudiants, a toujours un caractère "résistant", sans aucune référence à un quelconque mouvement (ou éventuel mouvement) relatif de glissement, au contact.

- l'effet d'entraînement qui exprime le fait qu'un solide peut être entraîné sans qu'aucune force (dans le sens de cet entraînement) n'agisse sur lui et qui se manifeste souvent par l'existence d'un lien entre les solides.

- l'indifférenciation entre force de frottement et phénomène de frottement: un phénomène unique de frottement solide et une force unique de frottement qui a, comme le phénomène, la propriété d'être résistante, voir dissipative.

Dans le chapitre suivant, nous allons analyser un certain nombre de manuels afin de voir comment ils parlent et traitent de ces phénomènes: sont-ils conscients des difficultés soulevées, sont-ils vigilants, favorisent-ils les raisonnements décrits ici, ou tout simplement leur permettent-ils de survivre?

CHAPITRE VI

ANALYSE DES MANUELS ET RAISONNEMENTS DES ETUDIANTS

Compte-tenu des raisonnements décrits dans ce travail, il paraît fort opportun d'aller voir de près ce que disent les manuels scolaires et universitaires. Notre objectif est d'analyser les livres disponibles sur le marché, susceptibles d'être utilisés, dans le cadre de leurs études, par les personnes interrogées au cours de ce travail: ainsi, nous avons analysé des manuels de terminale puisque nous avons interrogé des lycéens de la classe de terminale, des manuels de DEUG et de classes préparatoires puisque nous avons interrogé des étudiants de DEUG, etc..... Ayant interrogé des étudiants de la section E ainsi que quelques étudiants (mélangés aux autres) issus de la section F ou qui avaient obtenu un BTS, nous avons aussi analysé quelques manuels du technique. Nous n'avons, en revanche, pas du tout analysé de manuels à l'usage de futurs ingénieurs mécaniciens, ce qui ne signifie pas que cette analyse soit inintéressante; mais c'est une autre étude. Nous allons voir que ces manuels ne permettent qu'exceptionnellement aux étudiants de remettre en question leurs idées sur le frottement et même souvent contribuent à les renforcer. Nous en avions eu un léger aperçu lors de la phase exploratoire (chapitre II) où nous avons relevé, dans un manuel utilisé par les étudiants et les professeurs de première année d'Université au Brésil, quelques points pour le moins troublants.

Au total, nous avons consulté trente deux manuels (douze du secondaire, sept du technique et treize du supérieur), choisis parmi les plus représentatifs et les plus fréquemment utilisés. Deux possibilités s'offraient à nous: présenter les trente deux manuels les uns après les autres ou au contraire regarder dans l'ensemble des manuels quelques points précis, en liaison avec les points sur lesquels les étudiants achoppent, c'est ce qui a été choisi.

Nous terminerons par une étude critique entre les points ainsi relevés et les résultats obtenus au cours de ce travail.

1- Analyse des manuels

Les manuels de l'enseignement secondaire général sont ceux des classes de seconde, première et terminale. Les frottements n'occupent pas une place très importante dans les programmes valables jusqu'en 1993: les forces de frottement sont introduites assez rapidement en seconde pour montrer qu'il existe d'autre force que celle de la pesanteur: elles apparaissent à nouveau en classe de première à l'occasion de la non conservation de l'énergie mécanique et de la notion de chaleur. Nous les retrouvons, en terminale, à l'occasion des exercices où il est nécessaire d'appliquer la relation fondamentale de la dynamique.

Les manuels de l'enseignement technique comprennent ceux des classes de différentes 1ère F et de terminale ainsi que ceux qui s'adressent aux étudiants d'I.U.T. et de l'Enseignement Technique Supérieur.

Les manuels du supérieur ont été choisis parmi ceux qui s'adressent aux élèves de DEUG scientifique et des classes préparatoires aux grandes écoles.

La liste complète des trente deux manuels se trouve dans la bibliographie: les manuels du secondaire sont repérés par la lettre L, ceux du technique par la lettre T et ceux du supérieur par la lettre S.

Les points précis sur lesquels nous avons étudié ces manuels sont:

- le sens de la force de frottement cinétique et statique (comment est-il défini?; comment le texte, les figures et les exemples choisis se complètent-ils?).
- les schémas de forces (comment sont les forces: solitaires ou mariées; où sont-elles localisées?).
- le langage: quels termes sont habituellement utilisés pour désigner les forces de frottement statique et cinétique, le phénomène lui-même et y-a-t-il aussi dans ces manuels parfois confusion, au niveau du langage, entre phénomène et force?
- ce qui est dit sur les frottements dans les chapitres réservés au travail et/ou la puissance des forces de frottement et/ou l'énergie mécanique.
- la place et le rôle des exercices non corrigés qui sont proposés à la fin des chapitres.

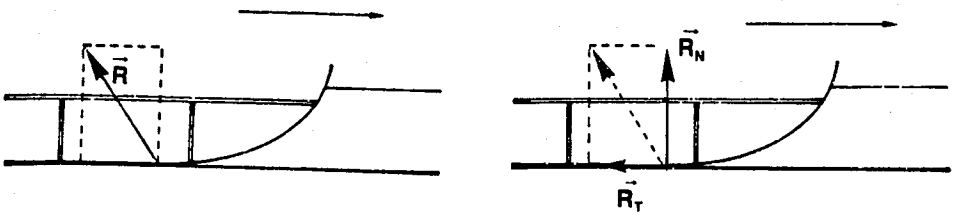
Dans ce qui suit, nous allons être amenés à citer des extraits de nombreux manuels. Les extraits non photocopiés seront écrits en italique et les mots soulignés le seront par nous, sauf indication de notre part.

1-1- Sens de la force de frottement

a) cas du glissement (frottement cinétique)

Les manuels, en ce qui concerne la définition de la direction et du sens de la force de frottement cinétique, se partage en trois catégories distinctes:

a1)- dans ces manuels, la force de frottement s'oppose toujours au mouvement, au glissement ou au déplacement du solide en question; la définition de cette propriété étant toujours accompagnée d'un exemple et/ou d'un schéma où le solide se déplace sur une surface fixe. Tous les manuels de cette catégorie ne mentionnent **jamais** que le sens de la force de frottement cinétique est lié au mouvement relatif des surfaces en contact les unes par rapport aux autres. Ce type de définition concerne la grande majorité des manuels du secondaire (neuf sur douze), une faible minorité des manuels du supérieur (deux sur treize) et aucun du technique. Ainsi, dans un manuel de seconde (L-12), à propos du glissement d'une luge sur la neige, on peut lire:



- ***Pourquoi la réaction est-elle inclinée lorsqu'il y a des frottements ?***
- L'effet du support sur l'objet est double :

– s'opposer à l'enfoncement ;
– s'opposer au mouvement.

On peut considérer que la force $\vec{R}$ qui traduit cet effet est composée de deux parties (on dit qu'elle a deux composantes) (figure 24) :

– la composante normale $\overrightarrow{R_N}$ qui s'oppose à l'enfoncement ;

– la composante tangentielle $\overrightarrow{R_T}$ qui s'oppose au glissement du système.

$\overrightarrow{R_T}$ représente donc les frottements de glissement exercés par le support sur l'objet.

On peut représenter une action de contact avec frottement de deux manières équivalentes :

– soit par un vecteur force $\vec{R}$ incliné en sens opposé au mouvement ;

– soit par les composantes ($\overrightarrow{R_N}$, $\overrightarrow{R_T}$).

Dans le dernier paragraphe, les auteurs décrivent (en caractère gras) les caractéristiques ou les propriétés générales des actions de contact. Autant le sens de la force $\vec{R}$ indiquée sur la figure est parfaitement correct, autant il est incorrect d'écrire que, en règle générale, ce vecteur $\vec{R}$ s'oppose au mouvement.

Dans la partie intitulée " *Travaux de quelques forces particulières*" d'un manuel de 1ère S et E (L-4), les auteurs commencent par définir la force de frottement à l'aide de l'exemple d'une luge et sa passagère descendant une pente neigeuse à vitesse constante:

" *Il est commode de considérer l'ensemble, l'action de la neige et l'action de l'air, agissant sur le système (luge et passagère). On peut caractériser cette action globale par deux forces réparties:* $\vec{R}$ *perpendiculaire à la surface de contact (neige-luge) que l'on apppelle réaction normale de la neige,* $\vec{f}$ *de sens opposé au vecteur vitesse* $\vec{v}$ *du mobile**, *que l'on appelle force de frottement.*"

Il n'est précisé nulle part pourquoi les forces de frottement sont des forces particulières et en quoi consiste cette particularité. De plus l'action de l'air est associée à celle de la neige, l'ensemble s'opposant à la vitesse du mobile.

Dans un manuel du supérieur, Le Bellac (S-7), la force de frottement est définie à l'aide de l'exemple d'une malle que l'on tire sur un sol horizontal en lui appliquant une force horizontale $\vec{F}$. La force de frottement $\vec{f}$ est dessinée, sur un schéma, en étant de sens opposé à celui de la force $\vec{F}$. On peut lire:

"$\vec{f}$ *est la force de frottement.....* $\boxed{\|\vec{f}\| = \mu \|\vec{N}\|}$ *(1)*

Cette expression est aussi valable pour un mouvement accéléré de la malle: dans tous les cas, la force de frottement est orientée en sens opposé du déplacement".*

Plus loin, est écrit:

" *La force de frottement (1) est ce que l'on appelle une force de frottement dynamique. La malle glisse sur le sol, et la force de frottement s'oppose au mouvement*"*.

Ainsi, la force de frottement dynamique s'oppose au mouvement et "dans tous les cas" elle s'opposera au déplacement! Nous constatons aussi que la même expression mathématique $f = \mu N$ est utilisée pour le corps au mouvement ou au repos: nous reviendrons sur ce point plus loin.

Dans un manuel d'exercices du supérieur, Schmauss (S-11), on trouve:

"*Les forces de frottement s'opposent toujours au mouvement alors que la poussée d'Archimède peut avoir un rôle résistant ou moteur*".

Cette phrase est tellement limpide qu'elle n'appelle aucun commentaire.

Les manuels de cette catégorie déclarent tous que la force de frottement s'oppose toujours au mouvement, au déplacement ou à la vitesse du mobile. De plus, tous les exemples étudiés concernent des corps qui se déplacent par rapport à une surface fixe.

* souligné par nous

Or, cette particularité n'étant jamais soulignée, cela amène à penser que les corps possèdent une vitesse ou un mouvement "vrai" par rapport auxquels la force de frottement doit toujours s'opposer.

a2)- dans cette catégorie, nous rencontrons des manuels où règne une certaine ambigüité sur le sens de la force de frottement (deux manuels du secondaire sur douze; un manuel du technique sur sept et six manuels du supérieur sur treize). En effet, dans ces manuels, au début du chapitre correspondant, les auteurs mentionnent que la force de frottement s'oppose au mouvement de glissement d'un solide par rapport à l'autre, pour ensuite affirmer qu'elle s'oppose au mouvement, sans référence aucune au mouvement relatif des solides. Dans la suite de l'exposé, les auteurs ne parlent plus jamais de cette opposition de la force de frottement au mouvement de glissement relatif des corps et, exemples et schémas de force se réfèrent toujours aux mouvements de corps se déplacant sur une surface fixe (le mouvement relatif pour le solide étudié et le mouvement "vrai" sont alors confondus).

Citons quelques extraits de manuels.

Dans un manuel de terminale C et E (L2), les auteurs commencent par donner des exemples, avant de donner la définition de la force de frottement:

" *Lorsqu'un solide de masse m (voiture dont les roues sont bloquées lors d'un freinage énergique, puck de hockey sur la patinoire, etc..) glisse sur un sol horizontal, son mouvement est ralenti*". On trouve, à côté de ce texte, un schéma sur lequel la force de frottement $\vec{R}_T$ s'oppose à la vitesse du solide de masse m placé sur un plan horizontal et le texte dit: " *la réaction du sol a donc nécessairement une composante horizontale* $\vec{R}_T$, *la force de frottement.*
De façon générale, quand deux corps glissent l'un par rapport à l'autre, chacun exerce sur l'autre une force de frottement, parallèle à la surface de contact, et tendant à s'opposer au glissement. "
Que signifie pour les auteurs le mouvement de glissement? S'agit-il d'un mouvement relatif d'un solide par rapport à l'autre?

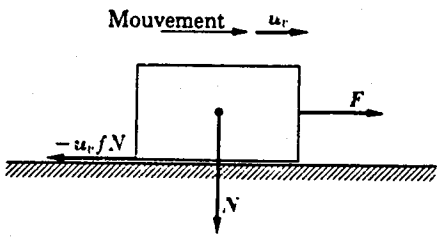
Alonso et Finn (S-1) commencent la partie réservée aux forces de frottement par:

"A chaque fois que deux corps sont en contact, comme dans le cas d'un livre qui repose sur une table, il y a une résistance qui s'oppose au mouvement relatif des deux corps. Supposons par exemple que nous poussions le livre le long de la table, en lui donnant une certaine vitesse. Après l'avoir lâché, il ralentit et finalement s'arrête. Cette perte de quantité de mouvement indique qu'une force s'oppose au mouvement; cette force est appelée force de frottement".

Plus loin, lorsque les auteurs parlent de la force de frottement en général, on peut lire:

" *la force de frottement de glissement s'oppose toujours au mouvement du corps, et par suite a une direction opposée à celle de la vitesse".*

Ce texte est accompagné du schéma suivant:



$\vec{u_v}$ = *vecteur unitaire dans la direction du mouvement*

f= f. de frottement

N = f. normale

..... *Sous la forme vectorielle* $\vec{f} = - \vec{u_v}\, fN$"

Dans un fascicule de Mécanique utilisé à l'Université de Paris Sud (S-4), les auteurs expliquent, à l'occasion des frottements, que, si on considère un " *objet ponctuel posé sur la surface d'un solide ou glissant sur cette surface S,* cet objet *subit de la part de la surface une force dite force de réaction*". La force de réaction en question est la résultante de deux composantes : $\vec{R_N}$ (force normale) et $\vec{R_T}$ (force de frottement). Ensuite, on peut lire:

Deux cas sont à considérer :

(i) Si l'objet M se déplace sur le solide support avec une vitesse $\vec{v}$ par rapport à ce dernier, d'une part on a $\|\vec{R_T}\| / \|\vec{R_N}\| = \text{tg}\ \alpha = k$ ou k désigne une constante > 0 appelée coefficient de frottement. D'autre part, vectoriellement deux cas sont possibles :

. $\vec{R_T}$ est orienté en sens contraire à $\vec{v}$ (force de freinage uniquement) dans ce cas :

$\vec{R_T} = -k\ \|\vec{R_N}\|\ \vec{u_t}$ avec $\vec{u_t}$ vecteur unitaire du repère intrinsèque en M

$\vec{R_T} = -k\ \|\vec{R_N}\|\ \vec{v} / \|\vec{v}\|$ $k > 0$ dans la direction de $\vec{v}$.

La norme de $\vec{R_T}$ ne dépend donc pas de la vitesse de l'objet M mais la direction et le sens de $\vec{R_T}$ en dépendent.

(ii) Si l'objet est au repos (en équilibre) sur le support, il n'y a pas de frottement sur la surface $\|\vec{R_T}\| = 0$, $\text{tg}\ \alpha = k = 0$, $\vec{R}$ est toujours normale à la surface au point M.

Ce texte est assez ambigü puisqu'il considère la vitesse de l'objet par rapport à son support. Il se trouve que cette vitesse, qui devient dans le texte vitesse de l'objet M (avec oubli de par rapport au support, ce qui revient pour les étudiants à ne considérer que la vitesse "vraie" de cet objet), est la même que la vitesse relative de glissement au contact d'une surface par rapport à l'autre.

Le Resnick et Halliday (S-10), déjà étudié dans le chapitre II, commence par parler de mouvement relatif, pour ne plus, dans toute la suite du manuel, faire apparaître l'adjectif relatif. Citons à nouveau un extrait de ce livre:

"*De fait, chaque fois que deux surfaces glissent l'une sur l'autre, des forces de frottement s'exercent sur chacune d'entre elles et s'opposent à leur mouvement relatif; les forces de frottement ne favorisent donc pas le mouvement.*"

En conclusion, tous les manuels de cette catégorie ressemblent, en fait énormément à ceux de la première catégorie, même si, au début du cours, est mentionnée le mouvement de glissement d'un corps par rapport à l'autre ou le mouvement relatif des corps en présence. En effet, très rapidement, le texte ne mentionne plus ce mouvement relatif ou de glissement: la suite du cours se réfère aux mouvements ("vrais") des corps et tous les exemples et schémas utilisés sont de même nature que ceux que l'on rencontre dans les manuels de la première catégorie: le solide étudié se déplace toujours sur une surface fixe.

a3)- dans cette rubrique, le sens de la force de frottement est défini sans ambigüité comme étant toujours opposée à "la vitesse de glissement" (vitesse relative d'une surface par rapport à l'autre). Cependant, cette vitesse de glissement n'est pas toujours définie et les exemples qui suivent l'exposé théorique sont de même nature que ceux des autres manuels: le solide étudié se déplace toujours sur une surface fixe. Nous trouvons dans cette rubrique une minorité des manuels du supérieur et la majorité des manuels du technique qui, très souvent, expliquent les forces de frottement à l'aide des torseurs des forces de contact. Citons, à nouveau quelques extraits de livres.

Provost- Joyal (S-9), dans le chapitre "R*ésistance au glissement- force de frottement de glissement*" commencent par écrire:

" *Puisqu'il y a glissement, c'est qu'il y a mouvement de S par rapport à* S_0" .

Les lois générales du frottement sont ensuite décrites:

" *1ère loi- La force de frottement* $\vec{R_T}$ *a même support que la vitesse de glissement* $\vec{u}$

Cela se traduit par (fig.)

$\vec{R_T} \wedge \vec{u} = \vec{0}$

2ème loi- La force de frottement $\vec{R_T}$ *est de direction opposée à la vitesse de glissement* $\vec{u}$ *. On a donc* $\vec{R_T} \cdot \vec{u} \leq 0$

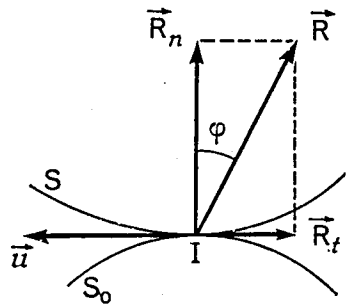
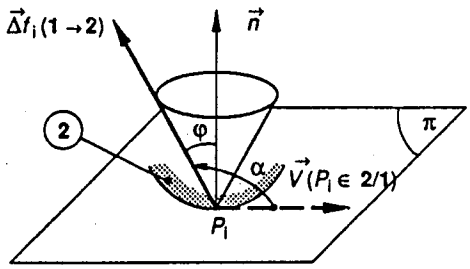


FIG. 67. — Angle de frottement φ.

La vitesse de glissement n'est apparemment pas définie et la seule explication que l'on trouve, par rapport à la vitesse de glissement est la suivante: "....*le mouvement est un mouvement de translation plan sur plan avec une vitesse de glissement* $\vec{u}$ ". Il est possible que les auteurs de ce manuel sachent que cette vitesse est définie dans une autre partie de cours, ce qui ne nous semble pas être une raison suffisante pour ne pas redonner (même rapidement) la définition de cette grandeur. Remarquons enfin que, dans les applications diverses données dans cette section, les solides se déplacent toujours sur une surface fixe, comme dans tous les autres manuels.

Dans un manuel de l'enseignement technique (T-2), la vitesse de glissement entre les solides 1 et 2 en contact est présentée de la façon suivante:



"*En* P_i *on dit qu'il y a frottement s'il y a mouvement relatif au point de contact entre 1 et 2, alors* $\vec{v}\ (P_i \in 2/1) \neq \vec{0}$

$\vec{v}\ (P_i \in 2/1)$ *est appelé vecteur vitesse de glissement de 2 sur 1 au point* P_i. "

Alors, le support de la force élémentaire de contact $[P_i, \vec{\Delta f}_i(1 \to 2)]$ appartient au plan $[P_i, \vec{n}, \vec{V}(P_i \in 2/1)]$; ce support est incliné de l'angle φ par rapport à la normale $(P_i, \vec{n})$ au plan (π), du côté opposé à $\vec{V}(P_i \in 2/1)$ d'où :

$$\boxed{\vec{\Delta f}_i(1 \to 2) \cdot \vec{V}(P_i \in 2/1) < 0}$$

L'étude qui suit "*suppose que le support et le sens du vecteur vitesse de glissement 2/1 est connu*". Il semblerait que, pour tous ces manuels, la vitesse de glissement soit une donnée et que l'on n'ait pas besoin de la déterminer.

Un autre manuel de l'enseignement technique (T-5) énonce les lois de Coulomb en utilisant les torseurs des actions de contact et de densité surfacique des forces de contact. Pour les auteurs de ce manuel, la force de frottement que le solide S_1 exerce sur le solide S_2 "*est opposée à la vitesse de glissement de* S_2 *par rapport à* S_1." L'exemple qui suit concerne deux solides S_1 et S_2 posés l'un sur l'autre qui sont en contact avec frottement. Vient ensuite une étude détaillée du cas où le solide du dessus S_2 est animé d'un mouvement de translation rectiligne par rapport à S_1. Le sens et la direction du vecteur vitesse de glissement sont donnés et ce vecteur est opposé à la force de frottement: tout se passe comme si S_1 était une surface fixe.

Avec les manuels de cette troisième catégorie, la force de frottement est correctement définie puisqu'elle s'oppose à la vitesse relative des surfaces en contact les unes par rapport aux autres (uniquement lorsque cette vitesse est différente de zéro). En revanche, cette vitesse relative n'est pas toujours définie, et, même lorsqu'elle l'est au début du chapitre correspondant, les auteurs utilisent toujours des schémas et des exemples de situations physiques où l'un des solides considéré est immobile, ce qui revient à identifier la vitesse de "glissement" au niveau du contact, à la vitesse "vraie" du mobile étudié. Soulignons enfin que les manuels de cette catégorie traitent de la mécanique du solide de façon plus approfondie que les manuels de première année de DEUG, certains poussant le formalisme très loin et ne laissant pratiquement pas de place à une analyse physique des situations étudiées.

En conclusion, malgré les différences qui existent entre tous ces manuels, nous constatons que, quelle que soit la façon dont est défini le sens de la force de frottement (opposée au mouvement du solide étudié ou à son mouvement relatif), les schémas de forces et/ou les exemples qui accompagnent ces définitions se réfèrent toujours à l'étude du mouvement d'un solide qui se déplace sur une surface fixe. Ainsi, quelle que soit la définition, la force de frottement s'oppose toujours, dans la pratique, au seul mouvement du solide puisque la vitesse relative des surfaces en contact est égale à celle du solide étudié par rapport à la surface (toujours fixe) sur lequel elle repose. Ainsi, le cours et les exemples choisis pour l'illustrer ne traitent jamais le cas d'une situation physique où il existerait une force de frottement qui ait un rôle moteur pour le solide étudié. Nous n'avons trouvé qu'un seul manuel qui traite de cette question (Gié et Sarmant (S-5)). Dans la section réservée aux "*Actions de contact entre deux solides*", les auteurs abordent le sujet en écrivant:

" *Mais avant tout détail, il convient d'insister sur le caractère purement passif des actions de contact. En bref, cela signifie que les actions de contact, seules, ne peuvent produire le mouvement, ou encore qu'elles ne peuvent globalement apporter d'énergie cinétique au système (voir §8.7)*"

Dans le § 8.7, section qui traite de la "*Puissance des actions de contact*", les auteurs expliquent plus clairement ce qu'ils ont voulu dire, et pour cela ils s'aident de l'exemple suivant:

Remarque : La propriété générale $\mathcal{P} < 0$ n'exclut pas que l'une des puissances $\mathcal{P}_1$ ou $\mathcal{P}_2$ puisse être positive. C'est le cas de «l'entraînement par frottement». Sur la figure 8.18 le solide S_2 mis en mouvement par l'action

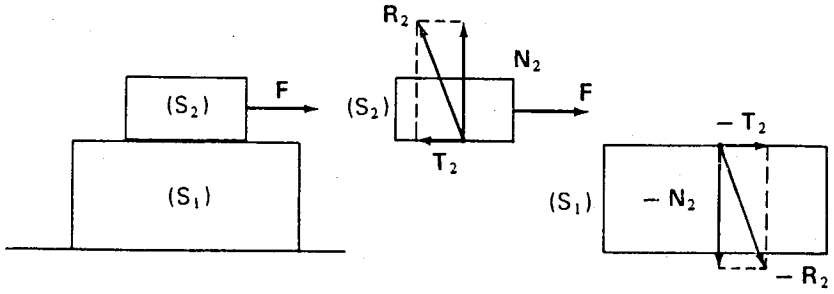


Fig. 8.18. - Le solide S_2 exerce sur S_1 la force $-\mathbf{R}_2$ dont la composante $-\mathbf{T}_2$ (force de frottement) est motrice.

de la force **F** entraîne le solide S_1 par frottement : $\mathcal{P}_2 < 0$, $\mathcal{P}_1 > 0$ et $\mathcal{P} = \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 < 0$. A nouveau, insistons sur le caractère purement passif des forces de frottement : l'entraînement par frottement n'est possible que par la mise en mouvement du solide S_2 sous l'action de la force «active» **F**.

Les auteurs insistent sur le caractère "purement passif" de la force de frottement et le rôle moteur de cette force est bien explicité sur les schémas éclatés et la légende. Il est surprenant de constater que les auteurs ne mentionnent jamais, dans la partie cours, qu'une force de frottement opposée à la vitesse relative de glissement peut être, dans certains cas, la seule force responsable du mouvement du solide étudié. Notons que ces deux auteurs parlent du caractère passif des forces de frottement et non de leur caractère résistant, ce qui représente une très grande différence.

b) cas du non glissement (frottement statique)

Dans ce cas, la vitesse relative au point de contact d'une surface par rapport à l'autre est nulle, et nous sommes en présence du frottement dit statique. Ici, le sens (c'est l'objet de nos préoccupations) de la force de frottement est à priori inconnue. Rappelons qu'il est possible de connaître le sens de cette force à l'aide des lois fondamentales de la dynamique ou en faisant une analyse qualitative de la situation (par exemple en cherchant le sens de l'éventuel mouvement relatif de glissement). Nous allons tout d'abord regarder ce qui est fait dans la partie cours de ces manuels, puis ensuite la nature des exercices corrigés qui suivent cette partie théorique dans le but de l'illustrer.

Partie cours:

En ce qui concerne la question du sens de la force de frottement statique, les manuels se répartissent en quatre catégories distinctes, la majorité des manuels se plaçant dans les deux premières catégories (vingt cinq sur trente deux).Ces nouvelles catégories n'ont pas forcément de rapport avec celles dégagées lors du frottement cinétique.

b1)-Dans cette catégorie, se trouvent tous les manuels qui ne mentionnent jamais le sens de la force de frottement dans le cas du non glissement, alors que le sens de la force de frottement est toujours définie quand il y a glissement.

On trouve, par exemple, dans Annequin et Boutigny (S-2):

b) **Propriété de $\vec{T}$.**

Deux cas sont à envisager :

— ou bien *le vecteur vitesse de glissement* $\vec{v}_g$ *de* (S) *sur* (S') *n'est pas nul* et l'on énonce les résultats suivants :

α) *Les vecteurs* $\vec{v}_g$ *et* $\vec{T}$ *sont colinéaires et de sens contraire*

$$\boxed{\vec{v}_g = -\lambda\vec{T},} \qquad \text{avec} \qquad \lambda > 0.$$

On dit que *la force* $\vec{T}$ *freine le mouvement de glissement;* on l'appelle le plus souvent la « *force de frottement* ».

β) Il existe un paramètre f appelé *coefficient de frottement, ne dépendant que de la nature des surfaces en contact* tel que

$$\boxed{|\vec{T}| = fN,} \qquad \text{avec} \qquad f > 0.$$

— ou bien *le vecteur vitesse de glissement de* (S) *sur* (S') *est nul.*
Dans ce cas de non glissement, on a

$$\boxed{|\vec{T}| < fN.}$$

Si, *de plus*, le coefficient de frottement est nul, on aurait $|\vec{T}| < 0$: conclusion impossible qui implique $\vec{T} = \vec{0}$; $\vec{R}$ est normal au plan tangent.

Résumé des conclusions.

$$\vec{R} = \vec{T} + N\vec{n}$$

$N > 0$ (liaison unilatérale)

	$\vec{v}_g \neq \vec{0}$ (glissement)	$\vec{v}_g = \vec{0}$ (pas de glissement)
$f > 0$	$\vec{v}_g = -\lambda\vec{T}$ $\lambda > 0$ $\lvert\vec{T}\rvert = fN$	$\lvert\vec{T}\rvert < fN$
$f = 0$	$\vec{T} = \vec{0}$ En l'absence de frottement de glissement, le vecteur $\vec{R}$ est normal au plan tangent en I, qu'il y ait ou non glissement.	

Rien n'est dit sur le sens de cette force, les auteurs n'en mentionnant que sa norme.

Dans un manuel de mécanique du solide de l'enseignement technique (T-5), on trouve:

" *2ème cas:* $\vec{v}\ (P_i \in S_2/S_1) = \vec{0}$

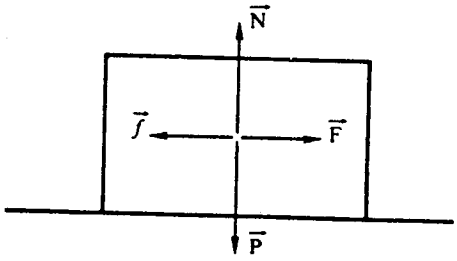
Lorsqu'il n'y a pas de glissement en P entre S_1 et S_2 , la densité surfacique au point P des forces de contact de S_1 sur S_2 se trouve à l'intérieur ou à la limite sur le bord du cône de frottement, ce qui se traduit par la relation:

$$\|\vec{t_p}\ (S_1 \rightarrow S_2)\| \leq f \|\vec{n_p}\ (S_1 \rightarrow S_2)\| \text{ "}$$

Le premier cas est celui où la vitesse de glissement est différente de zéro et les auteurs parlent explicitement du sens de la force de frottement. Ici, les auteurs ne disent pas un mot sur le sens de cette force, et en particulier sur le fait que ce sens n'est nullement défini.

b2)- les manuels de cette catégorie suggèrent que le sens de cette force est opposé à celui de la force motrice. Donnons quelques exemples, à titre d'illustration.

i- Le Bellac (S-7)" *Quand la malle est immobile, il faut lui appliquer une force minimale pour la mettre en mouvement. Cette force minimale est à nouveau égale à* $\mu \|\vec{N}\|$ *en valeur absolue. Quand* $\|\vec{F}\| < \mu \|\vec{N}\|$ *la malle ne bouge pas: une force de frottement statique* <u>*compense*</u> *la force appliquée* $\vec{F}$.

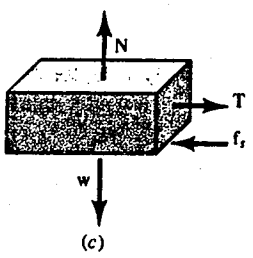


$\vec{F} + \vec{f} = 0$

Remarquez que $\vec{f}$ *s'ajuste de façon à compenser* $\vec{F}$*, du moins jusqu'à un certain point*"

ii- Kane/Sternheim (S-6)

" *Supposons maintenant que nous appliquions une faible force horizontale* $\vec{T}$ *dirigée vers la droite. Si le bloc reste au repos, la force de frottement* f_S *ne peut pas être nulle. Puisque, d'après la première loi, la force résultante est nulle, on en déduit que* $f_S = T$*. Si* $\vec{T}$ <u>*augmente progressivement*</u>*,* f_S <u>*augmente*</u>



<u>également</u>. Finalement, lorsque $\vec{T}$ atteint une valeur suffisamment grande, le bloc commence à glisser. Il existe donc une force de frottement statique maximum $\vec{f_s}$ (max)."

iii-Physique seconde (L-1) "*Plaçons un bloc de bois sur une table horizontale, et tirons sur le bloc au moyen d'un fil. Si l'effort de traction est insuffisant, le bloc reste au repos: c'est la force de frottement exercée par la table qui compense la force exercée par le fil*".

Etant donné le cadre restrictif (mouvement de translation pure sur une surface fixe) dans lequel sont étudiées les forces de frottement, ces trois citations laissent croire que la force de frottement statique s'oppose toujours à la force "motrice" puisqu'elle la compense: il est donc difficile d'imaginer qu'une force de frottement statique puisse être motrice. On ne voit pas très bien comment ces auteurs pourront expliquer aux étudiants que, par exemple, c'est la force de frottement que le sol exerce sur les roues motrices d'une voiture qui lui permet d'avancer.

b3)- Nous avons regroupé ici tous les manuels qui parlent en terme d'opposition de la force de frottement à la "tendance" au mouvement et/ou au déplacement (sans qu'il ne soit précisé par rapport à quoi est ce mouvement ou ce déplacement). Citons quelques extraits de manuels.

i- Physique seconde (L-12) : " *Une luge glisse très facilement sur une plaque de verglas (cas de frottement pratiquement nul). Par contre, nous avons du mal à la déplacer lorsqu'elle est directement posée sur le sol. Le sol exerce sur cette luge une action répartie de contact avec frottement qui <u>tend à s'opposer</u> à son enfoncement et à son déplacement (cas de frottements très importants).*

En présence de frottements, la réaction n'est plus perpendiculaire aux surfaces de contact. Elle est inclinée en <u>sens opposé du mouvement qui pourrait se produire</u>".

ii- Mécanique 1ère F (T-1)

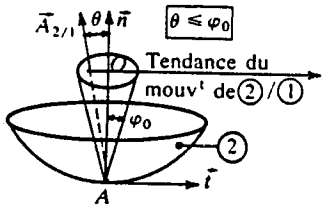


Fig: L'action de contact $\vec{A}_{2/1}$ se trouve dans le plan formé par la normale $\vec{n}$ et la direction $\vec{t}$ de la "tendance au mouvement " de 1 par rapport à 2.

"*<u>Propriétés:</u>...L'action de contact $\overrightarrow{A_{2/1}}$ se trouve dans le plan formé par la normale au contact et la direction de la "tendance au mouvement" et du côté opposé à la tendance au mouvement du système étudié 2 par rapport au système extérieur 1.*"
Les quelques manuels de cette catégorie se distinguent très nettement des précédents. En effet, le sens de la force de frottement ne reste plus "attaché" au sens de la force motrice, puisqu'il dépend, pour les auteurs, de la tendance au mouvement. Cependant, il est difficile de savoir ce que signifient "*tendance au mouvemement*" et" *mouvement qui pourrait se produire*".
de quel mouvement s'agit-il? et avec quel type de frottement (statique ou cinétique)?

b4)- Cette dernière regroupe les rares manuels (trois sur trente deux) qui déclarent que le sens de la force de frottement s'oppose à l'éventuel mouvement qui se produirait en absence de frottement. Citons quelques extraits.

i- Soutif (S-12): "*...on en déduit que $\overrightarrow{R_T}$ est toujours opposé au déplacement qui se produirait s'il n'y avait pas de frottement (par exemple si on ajoutait quelques gouttes d'huile au point de contact)*".

ii-Gié et Sarmant (S-5): " *La force $\overrightarrow{T}$ est dirigée de telle sorte qu'elle tend à s'opposer au glissement qui se produirait précisément en l'absence de frottement*".

L'absence de précision concernant le sens de "cette tendance au mouvement" trouvée dans la catégorie précédente b3 disparaît complètement ici: le sens selon lequel le mouvement de glissement pourrait se produire (au moment du déclenchement) est celui que le solide aurait si le frottement était nul. Toutefois, il apparaît encore une absence de précision concernant le mouvement qui se produirait (mouvement par rapport à quoi?).

<u>Les exercices corrigés</u>

Les exemples traités sont, en général, de deux types:

- les premiers étudient le mouvement de translation d'un corps se déplaçant sur une surface fixe. La plupart de ces exemples étudie le problème d'un corps qui se trouve, sur un plan incliné, dans l'état de mouvement imminent. Cet exemple est largement utilisé pour montrer comment il est possible de déterminer le coefficient de frottement statique à partir de la valeur de l'angle que fait le plan incliné avec le plan horizontal. De façon générale, les situations étudiées sont celles où le mobile se déplace par rapport à une surface fixe: la force de frottement statique, dans ce cas, s'oppose

toujours à la force extérieure et/ou au mouvement "vrai" du corps étudié (dans les rares manuels où le mouvement de translation en présence d'un frottement statique est abordé).

- les seconds étudient des mouvements de roulement sans glissement. L'exemple le plus souvent traité est celui d'une sphère ou d'un cylindre qui roule sans glisser sur un plan incliné: les conditions dynamiques selon lesquelles le mouvement se produit sont très rarement analysées, la plupart des manuels partent du principe que la force de frottement statique s'oppose "naturellement" au mouvement de translation du centre de masse.

Par exemple, dans le Resnick et Halliday (S-10), on trouve, à la fin d'un exemple (un cylindre roulant sans glisser sur un plan incliné) traité en appliquant le principe de conservation de l'énergie, une phrase qui se réfère à la présence d'un frottement statique dans le cas de mouvement de roulement sans glissement: " *Précisons qu'il faut une force de frottement statique pour faire rouler le cylindre*". Ensuite, ce même exemple est résolu à l'aide des équations de la dynamique: la force de frottement est représentée, sans aucune explication, comme une force étant en sens contraire de celui du mouvement de translation du centre de masse du cylindre. Ainsi, avec cet exemple, il est facile de penser qu'une force de frottement statique a un sens bien défini qui est celui qui s'oppose au mouvement de translation du centre de masse des corps.

Quand on trouve dans des manuels des exemples dans lesquels la force de frottement statique ne s'oppose pas au mouvement de translation du centre de masse (par exemple, le cas des roues motrices d'une voiture), ce résultat est très rarement mis en valeur, car la force de frottement est seulement dessinée sur un schéma sans aucun commentaire. Deux manuels (sur les trente deux) commentent le fait que le sens de cette force est, dans le cas étudié, le même que celui du mouvement du solide étudié. Citons ces deux manuels.

Perez (S-8) étudie les conditions dans lesquelles une roue motrice peut rouler sans glisser, à vitesse constante, sur un plan incliné dans le sens de la montée. A la fin de l'exercice, l'auteur fait la remarque suivante:

" *Remarque:*[*] *L'analyse des équations du mouvement montre que la force de frottement* $\vec{R}_T$ *est, dans le cas d'une roue motrice, dirigée dans le sens du mouvement. Bien que ce soit elle, qui en dernier lieu, permette la montée, il convient de ne pas lui attribuer un rôle autre que celui d'un intermédiaire passif*".

Gié et Sarmant (S-5) étudient également une roue motrice qui roule sans glisser sur un plan horizontal. Ils déterminent l'expression qui donnent la valeur de la force de frottement $\vec{T}$. Comme T est positif, les auteurs écrivent:

---

[*] souligné par l'auteur

"La réaction $\vec{R}$ est donc telle que la force de frottement $\vec{T}$ provoque le mouvement en avant du centre d'inertie. Mais il convient de ne pas oublier le rôle passif de la force de frottement. C'est évidemment le couple moteur qui provoque le mouvement de roulement par le biais de la rugosité du contact sol-roue".
(C'est dans ce manuel que nous avons trouvé le seul exercice corrigé (page 120) de translation pour lequel les auteurs notent que la force de frottement cinétique a un rôle, dans l'exemple étudié, de force motrice).

Ces auteurs mentionnent qu'une force de frottement peut provoquer un mouvement et insistent sur l'aspect passif de cette force, et non sur l'aspect résistant.

Finalement, la grande majorité des manuels ne donne aucune information ou suggère des conclusions erronées (catégories b_1 et b_2) sur le comportement d'une force de frottement statique, spécialement lorsque le glissement des corps étudiés est imminent. La très faible minorité des manuels qui aborde cette question d'un point de vue qualitatif le fait de façon incomplète ou ambigüe (catégorie b_3). La dernière catégorie est de loin la plus satisfaisante. Quand ces manuels étudient des exemples, pour illustrer leur cours, la majorité d'entre eux présente des problèmes où le sens "attribué" à la force de frottement est contraire à celui du mouvement de translation des corps (par rapport à la surface de contact qui est toujours supposée fixe). Les autres présentent un exemple où la force de frottement a le même sens que celui du mouvement de translation d'un corps qui roule sans glisser, sans pour autant s'apesantir longuement sur ce cas. Il ressort de cette analyse que la majorité des manuels brille par une absence d'informations précises et correctes sur les propriétés des forces de frottement statique et suggère qu'une force de frottement statique a une direction et un sens définis, dès lors que les mouvements effectifs des solides sont connus.

c)- frottement statique-frottement cinétique

Il ressort de cette première étude que les auteurs des différents manuels développent davantage l'étude des propriétés du frottement cinétique que celles du frottement statique.

Les lois macroscopiques du frottement cinétique sont sans ambigüité et permettent de déterminer assez facilement la norme et le sens de la force de frottement correspondante, à condition de bien préciser (et d'insister en s'aidant de nombreux exemples) que cette force s'oppose à la vitesse **relative** de glissement au contact d'une surface par rapport à l'autre. Cette absence de précision a des conséquences assez facheuses, puisque la majorité des exemples utilisés consiste à étudier des mouvements où justement la vitesse relative de glissement s'identifie avec la vitesse "vraie" du corps

étudié. Or, tout le problème est là: n'étudier que des situations de ce type laisse croire que la force de frottement s'oppose toujours au "mouvement ".

Quand au frottement statique, les manuels suggèrent que la force de frottement a une direction et un sens bien définis, en s'opposant soit au mouvement donné du solide étudié, soit à la force motrice. Par ailleurs, il n'est jamais dit clairement que certaines situations physiques, pour lesquelles les solides étudiés sont en mouvement relatif non nul, sont aussi des situations de frottement statique dès que la vitesse relative de glissement, au contact, est nulle.

Une autre difficulté apparaît au sujet de la norme de la force de frottement statique. Pour cela, comparons les deux lois existantes:

$f_S \leq \mu_S N$ pour le frottement statique et

$f_C = \mu_C N$ pour le frottement cinétique

La deuxième loi nous permet de connaître de façon précise la norme de la force de frottement cinétique, le sens étant déterminé par une autre loi de Coulomb, alors que la première nous indique que la norme et le sens de la force de frottement statique est entièrement indéterminée sauf que la norme de cette force peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et $\mu_S N$. Lorsque la norme de la force de frottement statique atteint cette valeur maximale, cela signifie que les corps en présence sont en état de mouvement imminent et qu'à partir de là, le mouvement peut se déclencher. Cette différence entre les propriétés de ces deux types de frottement n'est pas mise en évidence par la quasi totalité des manuels, et cela permet aux lecteurs d' identifier les deux phénomènes ou de réduire cette différence à une question de repos ou de mouvement des corps en présence. Pour illustrer cette conclusion, nous voudrions citer largement un manuel qui est, de ce point de vue, parfaitement limpide. Il s'agit du Le Bellac (S-7): Une malle est posée sur le sol horizontal, on lui applique une force $\vec{F}$. La malle reste au repos. L'auteur écrit:

" *$\vec{f}$ est la force de frottement; cette force est, en norme, proportionnelle à la réaction normale $\vec{N}$. Le coefficient de proportionnalité μ est appelé* ***coefficient de friction*** *(typiquement $0,1 < \mu < 1$)*

$$\boxed{\|\vec{f}\| = \mu \|\vec{N}\|} \quad (1)$$

Cette expression est aussi valable pour un mouvement accéléré de la malle: dans tous les cas la force de frottement est orientée en sens opposé du déplacement."

Plus loin, l'auteur écrit:

" *La force de frottement (1) est ce que l'on appelle une force de frottement* ***dynamique****: la malle glisse sur le sol, et la force de frottement s'oppose au mouvement. Quand la malle est immobile, il faut lui appliquer une force minimale pour la*

* en gras dans le texte

mettre en mouvement. Cette force minimale est à nouveau égale à $\mu\vec{N}$[1] *en valeur absolue...*

[1] (note en bas de page) "*En toute rigueur, on doit distinguer un coefficient de friction dynamique* μ_d *et un coefficient de friction statique* μ_s. *Dans l'équation (1)* $\|\vec{f}\| = \mu_d \|\vec{N}\|$ *tandis que sur la figure....la malle est en mouvement lorsque* $\|\vec{F}\| > \mu_s \|\vec{N}\|$. *En général* μ_s *est plus grand que* μ_d. *Afin de ne pas compliquer inutilement l'exposé, nous nous en tiendrons par la suite à un coefficient de friction unique* μ. "

La dernière phrase se dispense de commentaires et explicite le point de vue adopté dans le texte, à savoir une réduction à un seul type de frottement.

Avant de clore cette partie sur le sens des forces de frottement et les lois qui permettent de le déterminer, nous voudrions citer LE manuel qui s'exprime en terme d'indétermination de la force de frottement statique: il s'agit du Provost-Joyal (S-9). Dans la section intitulée " *Force de frottement au repos*", les auteurs décrivent l'expérience suivante: à un cylindre d'axe vertical et posé sur un plan horizontal est accroché un dynamomètre. $\vec{f}$ désigne la force de traction que le dynamomètre exerce sur le cylindre et ce dernier reste au repos "*tant que la force de traction* $\vec{f}$ *n'atteint pas une valeur limite* $\vec{f_0}$." Dans un deuxième temps, les auteurs interprètent cette expérience:

2° **Interprétation.** — L'équilibre exige que, pour le solide S au repos :

$$\vec{R}_t + \vec{f} = \vec{0}.$$

Or il y a repos pour $\vec{f} < \vec{f}_0$. Si l'on représente les éléments de réduction des forces au point I (fig. 71), l'équilibre a lieu pour toute force $\vec{f}$ comprise à l'intérieur du cercle C de centre I et de rayon f_0.

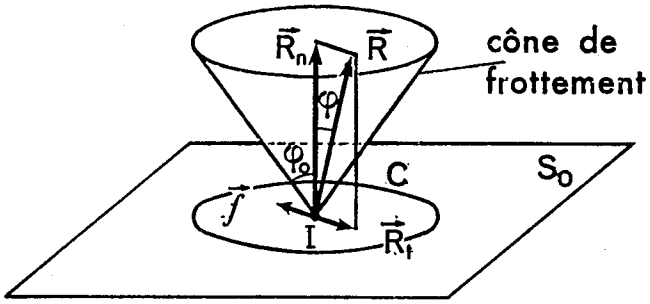


FIG. 71. — Force de frottement au repos.

Comme $\vec{R}_t = -\vec{f}$, la force de frottement au repos est, elle aussi, comprise dans ce cercle, sa valeur limite est $R_{t0} = k_0 R_n$.

La force de frottement au repos est indéterminée en module, en direction et sens ***si l'on ne connaît pas les autres forces appliquées au solide.***

Nous constatons que, avec la phrase (2) écrite en caractère gras, les auteurs insistent beaucoup sur l'indétermination de la force de frottement et la nécessité de connaître toutes les forces en jeu.

1-2- Schémas de forces

Nous avons examiné les schémas de forces des manuels en regardant de façon précise deux points importants: les forces de contact sont-elles mariées ou solitaires et sur quels objets sont-elles appliquées?

a) les forces de contact sont-elles mariées ou solitaires?

Deux manuels sur les trente deux dessinent de temps en temps toutes les actions de contact entre deux solides et donc des forces mariées. Tous les autres ne dessinent jamais les deux forces de frottement et les deux forces normales qui représentent les résultantes des actions de contact entre les deux surfaces en présence: ils ne représentent donc qu'une force de frottement et qu'une force normale, celles qui s'exercent sur le solide étudié. De plus, les situations physiques choisies sont telles que ces forces solitaires sont celles que la surface du dessous exerce sur la surface du dessus. Ainsi, pour la grande majorité des manuels, la loi des actions réciproques n'apparaît jamais sur les schémas de forces et il existe un sens privilégié pour la représentation des forces de contact: le sens du dessous vers le dessus.

Revenons maintenant sur les deux manuels qui représentent sur quelques schémas des forces mariées et regardons ce qu'ils font.

i-Buhot et Tuillier (T-7) dans un manuel d'enseignement technique supérieur écrivent dans la section réservée au "*Travail des forces de contact*":

> Soient deux solides (S_1) et (S_2) ayant un point commun M qui peut varier aussi bien sur (S_1) que sur (S_2). Nous allons considérer le cas fréquent où (S_1) et (S_2) admettent chacun un plan tangent en M, ces deux plans étant confondus suivant le plan π (fig. 3.8).

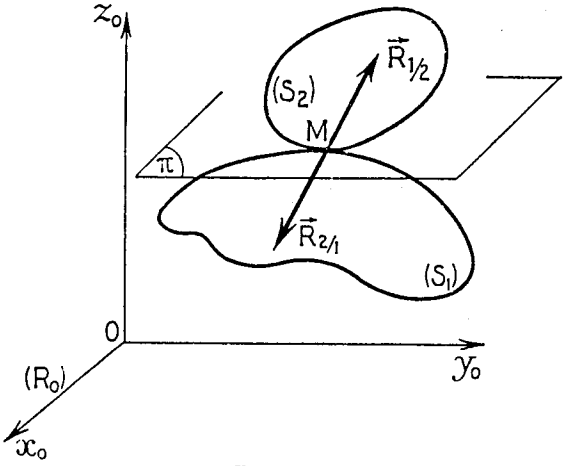


Fig. 3.8.

Par ailleurs, les forces de contact exercées en M par (S_1) sur (S_2) sont représentées par le vecteur unique $\vec{R}_{1/2}$ passant par M, ce qui revient à négliger les couples de résistance au roulement et au pivotement dont les influences sont généralement négligeables devant le frottement de glissement.
Enfin les mouvements sont repérés par rapport au repère (R_0).

Les deux forces de contact sont effectivement dessinées; ce qui est très satisfaisant. Cependant le texte ne se réfère qu'à la force $\vec{R}_{1/2}$ (force que le solide du dessous exerce sur le solide du dessus) et ne parle plus de la deuxième force $\vec{R}_{2/1}$.

Par la suite, tous les schémas du manuel représentent toujours la seule force $\vec{R}_{1/2}$, comme l'indique la figure ci-contre.

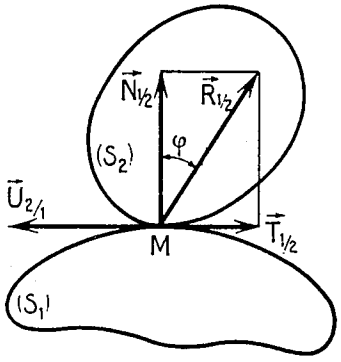
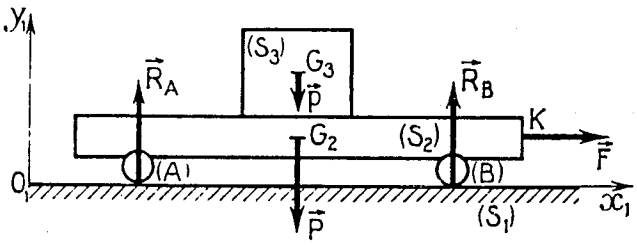


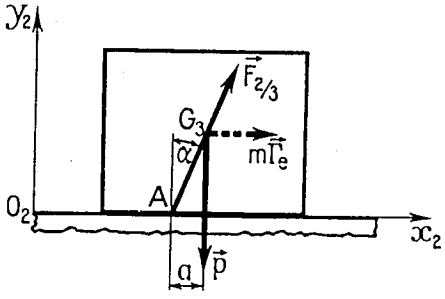
FIG. 3.9.

Plus loin, l'exercice suivant est corrigé: il s'agit d'un bloc (S3) qui repose sur un chariot (S2), lui-même pouvant se déplacer sur un sol plan horizontal grâce à l'action d'une force $\vec{F}$ qui lui est appliquée. Les frottements entre le sol et le chariot sont négligés et il existe un frottement entre le bloc et le chariot. Les auteurs étudient le mouvement de l'ensemble chariot plus bloc, puis " *l'équilibre relatif du bloc sur le chariot*". Les schémas proposés sont les suivants:

"Mouvement d'ensemble"



"Equilibre relatif du bloc sur le chariot"



Les auteurs traitent, chose rarissime, un exemple d'équilibre relatif: on aurait pu penser qu'ils exploitent cette situation pour insister sur le fait que les forces de contact et donc de frottement s'exercent sur les deux corps en contact. Les deux schémas réalisés montrent qu'il n'en est rien. En définitive, on ne sait pas très bien quelles ont été les intentions des auteurs en indiquant sur une seule figure des forces mariées, sans jamais les utiliser par la suite.

ii- Gié et Sarmant (S-5) dans la section " *Actions de contact entre deux solides*" écrivent que lorsque deux solides S_1 et S_2 sont en contact " *la loi des actions réciproques impose que:*

$$\vec{R}\ (S_2 \rightarrow S_1) = -\vec{R}\ (S_1 \rightarrow S_2)$$

$$\vec{M}_O\ (S_2 \rightarrow S_1) = -\vec{M}_O\ (S_1 \rightarrow S_2)$$

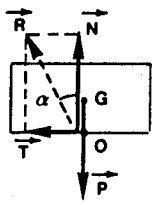
Les auteurs utilisent ensuite un schéma "classique" (similaire à celui de la figure 3.9 de l'exemple précédent) pour illustrer les lois de Coulomb. Cependant, ce sont les seuls qui lors du chapitre sur la "*Puisssance des forces de contact*" proposent l'exemple des deux blocs qui se déplacent l'un par rapport à l'autre et où nous trouvons des schémas éclatés avec des forces dessinées sur les **deux** blocs (cet exemple a été cité dans le paragraphe précédent).

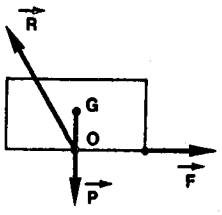
En conclusion, rares sont les manuels qui dessinent des forces mariées et nombreux sont les manuels qui ne dessinent que des forces de contact orientées du dessous vers le dessus!

b) localisation des forces de contact sur les schémas de forces

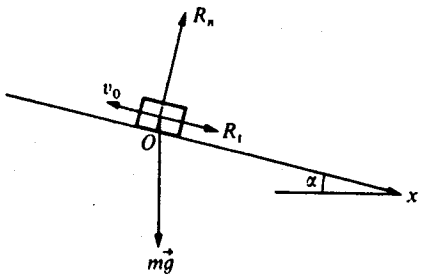
Dans l'ensemble des manuels, le point d'application de la force de frottement (il faut bien écrire la force de frottement puisqu'une seule force apparaît sur les schémas) se trouve, pour la majorité d'entre eux, en un point de l'interface, c'est à dire de la surface de contact des deux solides en présence, comme l'indiquent ces schémas:

Cas de la translation

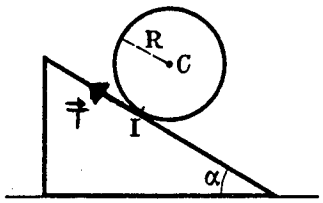


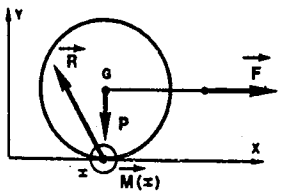


Cependant, dans le cas de la translation pure, on peut trouver cette force localisée au centre de masse du solide étudié:

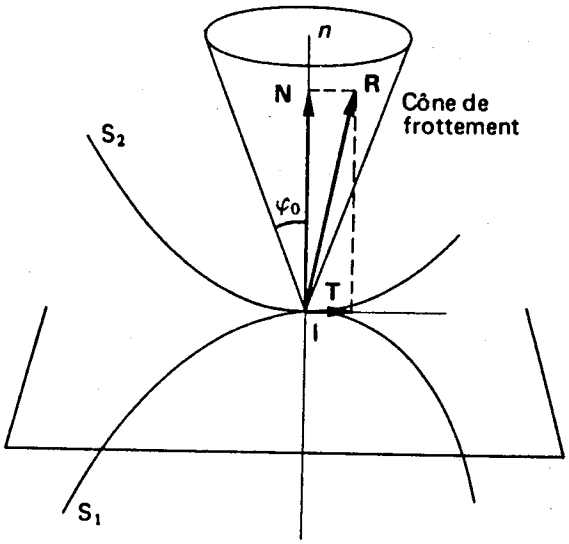


Cas de la rotation





Cas général (rotation et translation)



Dans les manuels de l'enseignement technique et du supérieur, ces forces sont presque toujours localisées à l'interface; ce n'est que dans quelques manuels de

l'enseignement secondaire que l'on trouve des forces localisées au centre de masse du solide étudié. Cette localisation au centre de masse est certainement dûe au fait que le mouvement de translation du centre de masse est obtenu en appliquant la relation fondamentale de la dynamique où interviennent toutes les forces qui s'exercent sur le corps étudié, sans se préoccuper de leur point d'application. Cependant, cette façon de procéder occulte le fait que le point d'application de ces forces de frottement est extrêmement important: il intervient quand on veut calculer les moments de ces forces et il illustre le fait que ces forces sont des forces de contact.

Revenons aux forces uniques localisées à l'interface. Un premier problème apparaît lorsqu'on constate que la seule force dessinée et utilisée est celle que le solide situé sous l'interface exerce sur le solide situé au dessus. Nous reviendrons sur le problème de la localisation à l'interface de cette force plus loin.

1-3- Le langage des manuels

Nous savons que le langage est souvent révélateur des modes de pensée et de compréhension des gens. Nous avons donc recensé tous les termes qui servent à désigner les forces de frottement et la vitesse relative de glissement d'une surface l'une par rapport à l'autre.

Les forces de frottement cinétique sont appelées:" *force de résistance, force de résistance au glissement, résistance au glissement, force de freinage*" . Tous ces termes contiennent l'idée d'opposition, de résistance ou de freinage. Il est extrêmement difficile avec cette terminologie d'imaginer un seul instant qu'une force de frottement cinétique puisse provoquer un mouvement! Bien sur, l'idée qui est derrière cette terminologie est liée au fait qu'une force de frottement n'existe que si une force (que l'on appelle souvent motrice d'ailleurs) n'est exercée sur le système étudié. Il n'empêche que la terminologie est loin d'être neutre.

Les forces de frottement statique sont appelées tout simplement " *force de frottement (ou de friction) statique*" ou encore, dans quelques manuels,"*adhérence*" ou "*force de frottement de repos*", ce qui permet de supposer que ce type de frottement n'existe que lorsque les solides concernés sont tous au repos dans le même référentiel, ce qui nous ramène au problème soulevé au premier paragraphe de ce chapitre.

Les manuels utilisent le terme de "*vitesse de glissement*": est-il clair pour tout le monde qu'il s'agit d'une vitesse relative au contact?

Revenons sur l'un des termes employé pour la force de frottement cinétique, à savoir "*résistance au glissement*" . Ce terme est très ambigü puisqu'il peut aussi bien désigner le phénomène que la force. Ceci nous amène à constater que souvent les manuels, à un moment ou à un autre, expriment que le frottement est une force ou l'inverse. Nous avons déjà cité quelques auteurs, citons-en encore quelques uns.

- Kane et Sternheim (S-6) commencent le cours sur "*Le frottement* " en affirmant que:

" *le frottement est une force qui agit toujours pour s'opposer au mouvement...* "

- Resnick et Halliday (S-10), à propos d'un bloc au repos sur une surface horizontale auquel est attaché un ressort pour mesurer la force nécessaire pour le mettre en mouvement, écrivent:

" *Il faut en conclure qu'une force agissant le long des surfaces vient équilibrer la force appliquée: c'est un frottement*"

- Alonso et Finn (S-1), en expliquant que la force de frottement" $\vec{Ff}$" peut être considérée comme proportionnelle à la force normale $\vec{N}$ et que "*la constante de proportionnalité est appelée le coefficient de frottement, qu'on désigne par f*" écrit ensuite:

"*on a, en grandeur* $\boxed{Ff = \text{frottement de glissement} = fN}$ "

Le problème n'est pas de s'attacher de façon pointilleuse à ce type de phrase; mais simplement d'indiquer que ces phrases sont sans doute révélatrices d'un amalgame entre force de frottement et frottement et qu'en tout cas, si ce n'est pas le cas pour le ou les auteurs, elles risquent de favoriser chez les étudiants l'amalgame en question. De plus, ces phrases sont toujours au singulier: le frottement n'est pas égal **aux** forces de frottement mais **à la** force de frottement, ce qui, au passage, renforce l'idée qu'il n'existe qu'une seule force de frottement et un seul frottement, pouvant ainsi englober sous ce singulier le frottement cinétique et le frottement statique.

1-4- Travail et/ou Puissance et/ou Energie mécanique

Même les manuels qui accordent peu de place à l'étude des forces de frottement, reviennent tous sur le sujet à l'occasion du chapitre sur le travail et l'énergie. En effet, c'est l'occasion de parler de la non conservation de l'énergie mécanique, de forces dissipatives etc...Lors de l'analyse de ces chapitres, nous avons retrouvé certaines caractéristiques dégagées plus haut. Nous en retiendrons deux: celle qui concerne le caractère résistant des forces de frottement, que ce frottement soit statique ou cinétique et la non distinction entre phénomène et force.

a- Dans ces chapitres, il est souvent suggéré, voir explicitement écrit, que le travail ou la puissance des forces de frottement est toujours négatif ou que le frottement a toujours un caracère dissipatif d'énergie. Les auteurs parlent de " *travail résistant*", et" *de*

dissipation d'énergie". Nous trouvons cela dans tous les manuels du secondaire, mais pas uniquement. Citons, à titre d'exemple, un livre du supérieur:

Soutif (S-12) dans le chapitre "*Energie mécanique et frottements*" écrit :" *Si le point est gêné, il existe toujours du frottement....la présence de ce frottement provoque un travail de la réaction T_1 négatif*". Ensuite, il calcule l'énergie mécanique pour aboutir à la conclusion suivante: " *comme le travail est toujours négatif, l'énergie mécanique décroît au cours du mouvement*". Le travail de la force de frottement n'est nullement calculé dans cette partie du livre et pourtant l'auteur admet à priori que ce travail est toujours négatif.

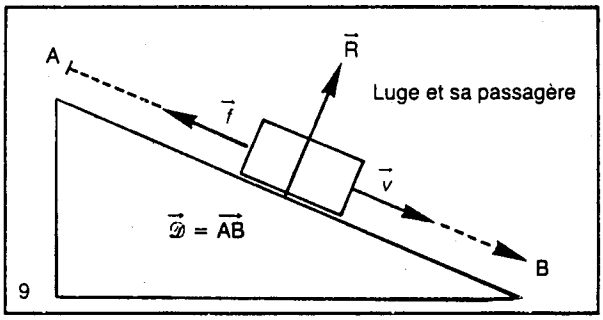
Or, il est incorrect de dire que le travail (ou la puissance) des forces de frottement est toujours négatif, et qu'en présence de frottement, l'énergie mécanique est toujours dissipée. En effet, dans le cas du frottement statique, le travail (ou la puissance) des forces de contact est nul et l'énergie mécanique n'est nullement dissipée à cause de ce type de frottement. Dans le cas d'un frottement cinétique, il n'est pas exclus d'avoir un travail de la force de frottement cinétique qui soit positif: c'est le cas de la situation physique de nos questionnaires A où le travail de la force de frottement qui s'exerce sur le bloc passif (et qui donc provoque son mouvement par rapport à la table, et dans le même sens que celui de cette force) est, sans aucun doute, positif. En fait, c'est le travail **total** des actions de contact (c'est à dire de l'ensemble des forces de frottement cinétique que deux solides en contact exercent l'un sur l'autre) qui est toujours négative, car elle ne dépend que du mouvement relatif des deux solides: les forces de frottement cinétique s'opposant à la vitesse **relative** de glissement des surfaces les unes par rapport aux autres, la puissance totale (ou le travail) des actions des deux solides est toujours négatif. Ainsi, le phénomène de frottement cinétique a un caractère dissipatif, non parce que le travail de chaque force de frottement est toujours négatif, mais parce que le travail total des actions de contact des deux solides l'est.

Notons encore que les phénomènes de frottement cinétique et de frottement statique sont englobés sans distinction aucune dans un seul et même phénomène, celui des frottements, puisque le travail des forces de frottement est toujours, pour la majorité des auteurs de manuels, négatif....

b- phénomène de frottement et force de frottement sont souvent confondus

Ce point a déjà été soulevé un peu plus haut, nous le retrouvons ici à l'occasion du travail. Citons un extrait de manuel de 1ère S et E (L-4).

Les auteurs de ce manuel calculent, dans le chapitre "*Travail de quelques forces particulières*", le travail de la force de frottement exercée sur une luge qui glisse sur un plan incliné.



Le travail calculé est évidemment négatif. Les auteurs font ensuite les commentaires suivants:
"*La force de frottement effectue un travail résistant. C'est un fait général: lorsqu'il y a déplacement avec frottements, ceux-ci effectuent toujours un travail négatif*".

Puis, cinq lignes plus loin:

"*Dans le cas général, les forces de frottement varient, en particulier avec la vitesse; leurs travaux sont difficiles à calculer mais sont toujours négatifs*".

Cet extrait appelle un certain nombre de remarques:

- la figure est incorrecte, car la force de frottement est localisée au centre de masse de la luge, alors que la composante normale de la force de contact est localisée à l'interface: cela simplifie la compréhension du problème physique!

- on passe de "*la force de frottement effectue un travail*" à "*les frottements effectuent un travail*" à "*les forces de frottement effectuent.*".. Frottement et forces de frottement sont utilisés indifféremment l'un pour l'autre.

- les auteurs considèrent comme équivalent de dire que "*la force de frottement effectue un travail négatif* " ou que " *les travaux des forces de frottement sont toujours négatifs*". Nous avons déjà vu ce qu'une telle écriture impliquait.

1-5- Les exercices proposés

Nous avons déjà constaté que, dans la plupart des manuels, les exercices traités dans la partie cours concernent un solide qui se déplace toujours sur une surface fixe dans un référentiel donné: la force de frottement qui s'exerce sur ce solide est donc toujours de sens opposé à celui de son mouvement dans ce référentiel. La question est de savoir si les exercices proposés, non corrigés, sont ou non de même nature. On trouve deux types de manuels, ceux qui continuent sur le même type d'exercices et ceux qui proposent des situations où la force de frottement sur un solide peut provoquer le mouvement de ce solide.

a) La grande majorité des manuels du secondaire est du premier type en proposant dans les pages d'exercices des situations où la force de frottement demandée est toujours de sens opposé à celui du mouvement du solide sur lequel elle agit. Cependant, nous

nous trouvons parfois devant des problèmes incompréhensibles, comme celui-ci, extrait d'un manuel de 1ère SE (L-10):

" *Un cycliste de masse 75kg monte une côte à 5% en mouvement rectiligne uniforme et les frottements sont négligeables.*
a- Quel est le travail... "

Comment le cycliste peut-il monter la côte s'il n'y a pas de frottement? Ne risque-t-il pas, s'il commence sa montée au milieu de la côte, de se retrouver en bas en très peu de temps et sans savoir pourquoi?

De même, parmi les exercices classiques du secondaire, on trouve souvent celui de la voiture ou du train qui se déplace sur une route ou une voie horizontale avec un mouvement uniformément accéléré, et dans lequel on demande de calculer la force motrice en négligeant toutes les forces de frottement. Comment les étudiants pourront-ils ensuite croire ceux qui leur affirmeront que la voiture ou le train ne pourraient pas démarrer s'il n'y avait pas de frottement, et que, dans ce cas précis, la seule force extérieure qui agit sur la voiture ou le train est justement la force de frottement qui est dans le même sens que celui du mouvement de la voiture (ou du train).

b) d'autres manuels (comme le Resnick et Halliday (S-10) par exemple) propose des exercices où la force de frottement à trouver est "motrice". Aucun de ces exercices ne demande aux étudiants de faire un schéma des forces en jeu et d'indiquer la direction et le sens des différentes forces de frottement. De ce fait, la résolution consiste bien souvent à faire des calculs de norme sans avoir la possibilité de se rendre compte que la force de frottement à déterminer est dans le sens du mouvement du solide étudié.

2- Analyse des manuels et raisonnements des étudiants

Nous avons dégagé un certain nombre de caractéristiques des raisonnements estudiantins, puis celles des manuels en usage. Nous allons examiné point par point les relations qui existent entre eux.

2-1- Norme, direction et sens des forces de frottement

a) cas du frottement cinétique

Nous avons constaté que la majorité des étudiants considère que les forces de frottement cinétique:

- s'opposent toujours au mouvement de l'objet, sans référence aucune au mouvement relatif des surfaces les unes par rapport aux autres
- ne sont pas perçues comme étant des forces qui peuvent créer le mouvement d'un solide

- sont des forces de norme définie, qui "résistent" au mouvement des solides.

L'analyse que nous venons de faire montre que la définition du sens des forces de frottement est présentée, dans la plupart des manuels, de telle sorte qu'elle ne permet nullement aux étudiants de remettre en question les idées qu'ils ont sur le sens de cette force de frottement. Le caractère relatif de la vitesse relative de glissement, même lorsqu'un manuel le mentionne, est complètement gommé par les exemples et les exercices proposés, puisque la majorité de ces derniers traitent de situations pour lesquelles vitesse relative de glissement et vitesse du mobile étudié ne font qu'un.

b) cas du frottement statique

Nous avons constaté que la majorité des étudiants considère que les forces de frottement statique:

- ont un sens bien défini par rapport aux mouvements donnés des solides sur lesquels elles agissent en s'opposant toujours à ces mouvements.

- ont des propriétés similaires à celles des forces de frottement cinétique

Là encore, les manuels participent largement à renforcer les idées qu'ont les étudiants sur le frottement statique, comme nous l'avons constaté un peu plus haut. En particulier, le caractère "imprévisible" des forces de frottement statique est totalement absent de la quasi totalité des manuels; au contraire, leur lecture laisse penser qu'une force de frottement statique a un sens bien défini, comme dans le cas des forces de frottement cinétique. Cette lecture nous conduit souvent à penser que: "le frottement cinétique intervient uniquement lorsque le ou les corps étudiés sont en mouvement (dans un référentiel donné) et le frottement statique n'existe que lorsque les corps étudiés sont au repos, dans ce même référentiel". Notre enquête ne nous permet pas de savoir comment les étudiants analysent une situation de frottement statique pour laquelle le deux solide étudié est au repos dans un référentiel donné, mais elle nous a montré que, dans les situations de mouvement, les étudiants ne se soucient nullement du repos relatif des points de contact du point de vue du non glissement relatif des deux surfaces et traitent de la même façon force de frottement statique et force de frottement cinétique. Nous retrouvons toujours ce problème de référentiels et de mouvements "vrais" par opposition aux mouvements apparents: les vitesses relatives de glissement sont, pour les étudiants, des vitesses apparentes, qui sont "*des illusions d'optique*" et ne sont, par conséquent, pas prises en compte. Il se trouve que les manuels se placent presque toujours dans des situations physiques où les mouvements relatifs et "vrais" sont confondus, ce qui "règle" peut-être un problème immédiat; mais ne règle nullement celui de cette vitesse relative. A cette difficulté de reconnaître un mouvement relatif, s'adjoint dans le cas du frottement statique, une difficulté supplémentaire qui concerne les zones de contact qui sont en repos relatif. Autant on conçoit assez bien que deux solides, comme nos deux blocs, soient en

repos relatif car ils forment, dans ce cas, un seul bloc indéformable: ce sont les mêmes points de chacun des solides en présence qui restent en contact durant tout le mouvement; autant on a du mal à comprendre ce qui se passe pour, par exemple, une sphère roulant sans glisser sur une table horizontale. Pour cette sphère, la vitesse de glissement du point de contact est certes nulle, mais les points des deux corps (sphère et table) qui sont en contact à un instant donné changent au cours du mouvement: ce qui complique beaucoup. Lorsque le contact est un point, certains parlent de "point coïncidant", la vitesse relative de glissement devenant la vitesse du point coïncidant.

Quant à la norme de la force de frottement statique, la majorité des étudiants considère qu'elle ne peut pas varier, ce qui est logique puisqu'ils attribuent à cette force les mêmes propriétés que celle d'une force de frottement cinétique, comme beaucoup de manuels. Ainsi, les différences fondamentales entre le frottement statique et le frottement cinétique ne sont jamais abordées et, encore moins, mises en évidence, à l'aide d'exemples dans l'ensemble des manuels étudiés.

2-2- Schémas de forces-Effet DD- Effet d'entraînement

Les schémas de force que l'on trouve dans les manuels et chez les étudiants se ressemblent étrangement: ils sont constitués essentiellemnt de forces solitaires et ces forces dessinées sont toujours celles qu'exerce le solide du dessous sur le solide du dessus. Rien d'étonnant de trouver un effet DD aussi important chez les étudiants. Ce qui est étonnant, en revanche, c'est de ne pas en trouver davantage, compte tenu de ce que nous avons vu dans les manuels. La loi des actions réciproques n'est qu'exceptionnellement appliquée par les étudiants, c'est la même chose dans les manuels. Cette force unique étant de façon majoritaire localisée à l'interface, tout laisse penser qu'à un interface donné correspond une seule et unique force de frottement, force qui n'agit que sur le solide qui se trouve au dessus de l'interface.

Nous n'avons rien trouvé dans les manuels qui ait un rapport quelconque, même éloigné, avec l'effet d'entraînement. C'est un point sur lequel, les manuels et les étudiants divergent. Mais est-ce vraiment une divergence? En fait, les manuels ne traitant quasiment jamais du problème où une force de frottement crée le mouvement du solide étudié, les étudiants sont libres de construire ce qu'ils veulent à l'aide des ingrédients dont ils disposent. Ainsi, si un solide se déplace dans un sens donné (cas de notre bloc passif), comme la force de frottement ne peut qu'être opposée à ce mouvement, il faut bien trouver une autre explication à ce mouvement: l'effet d'entraînement permet d'en rendre compte. Par ailleurs, l'amalgame entre force de frottement et le phénomène, que l'on rencontre ausi bien chez les étudiants que dans les manuels, est compatible avec le fait de considérer que le frottement est quelque chose qui se trouve entre les surfaces en contact et qui s'oppose au mouvement: c'est le lien qui permet l'entraînement et qui en même

temps résiste au mouvement. Rien dans les manuels ne vient contrecarrer cette compréhension du phénomène.

Notons enfin que ce ne sont pas les exercices proposés par les auteurs de manuels qui vont permettre aux étudiants de modifier quoi que ce soit sur leur compréhension du phénomène: nous avons longuement détaillé ce point lors de l'analyse des manuels pour ne pas nous étendre plus longuement dessus.

3- Conclusion

Le rôle attribué à un manuel dépend de son utilisateur (étudiant et/ou professeur): soit ce manuel constitue le noyau dur du cours, soit il apparaît comme un outil complémentaire d'un cours fait par ailleurs. Quelle que soit l'utilisation faite des manuels, il nous semble indiscutable qu'ils jouent un rôle très important dans l'enseignement, puisqu'ils servent de références aussi bien aux étudiants qu'aux professeurs: c'est ce qui a justifié en partie l'analyse qui précède.

Nous avons cherché à savoir, en analysant un nombre important de manuels d'horizons divers, si nous pouvions y trouver des éléments qui permettent aux raisonnements des étudiants de continuer à vivre, sans que jamais ils ne puissent être remis en cause. Cette étude a largement dépassé nos espérances. Tous les manuels non spécialisés ont choisi de parler de frottement, sans pour autant vouloir étudier à fond la question. Ce choix conduit à faire des simplifications dommageables en ne différenciant pas nettement les situations de frottement statique de celles de frottement cinétique, en établissant le dogme suivant lequel: " toute force de frottement s'oppose toujours au mouvement car est dissipative", en réduisant les deux types de frottement à un seul et en amalgamant forces et phénomènes. Il est vrai que ces phénomènes ne sont pas simples, car font intervenir des notions qui posent problèmes aux gens, comme par exemple, l'application de la loi des actions réciproques et les changements de référentiels. Mais, ce n'est pas tout: les lois qui régissent ces phénomènes ne permettent pas de calculer les forces correspondantes aussi facilement qu'une force d'attraction gravitationnelle, et, dans le cas du frottement statique, de prévoir à priori les grandeurs physiques associées. Le caractère "imprévisible" ou "adaptable" des forces de frottement statique est inhabituel, voire déroutant.

CHAPITRE VII
SUGGESTIONS PEDAGOGIQUES

Il ne s'agit pas ici de faire un cours sur le phénomène de frottement solide; mais de dégager des points forts qu'il nous semble important de développer. Cela suppose de définir ce que l'on souhaite que les élèves comprennent, retiennent d'un enseignement sur les frottements solides statique et cinétique, compte tenu des difficultés mises à jour lors de cette étude. Nous pouvons ainsi isoler quelques points qui nous paraissent essentiels.

1- Les lois de Newton

Les forces de contact normales et tangentielles au point, ligne ou surface plane de contact, exercées sur deux solides en contact sont des forces comme les autres, vis à vis des lois de Newton.

a) le mouvement de chacun des deux solides est obtenu en appliquant à chacun d'eux la deuxième loi de Newton ou le principe fondamental de la dynamique : en particulier, tout solide initialement au repos ne peut acquérir un mouvement que si une force ne s'exerce sur lui dans le sens du mouvement (1ère loi). Il est donc impossible qu'un solide, initialement au repos, puisse être mis en mouvement sans qu'aucune force, dirigée dans le même sens que celui du mouvement du solide, ne s'exerce effectivement sur lui, et ceci, quelle que soit la nature de la force: force de frottement ou autre.

b) à un contact donné correspond un couple de forces (troisième loi de Newton): les résultantes des actions de contact s'exercent ainsi sur chacun des solides concernés. Elles sont toujours orientées vers l'intérieur de chaque solide et ceci, quelle que soit la localisation d'un solide par rapport à l'autre (situé au dessous, au dessus..)

2- Les mouvements relatifs

Ce qui intervient dans l'étude du frottement, c'est le mouvement de glissement relatif des zones de contact des solides concernés les unes par rapport aux autres (frottement cinétique) ou l'absence de ce mouvement (frottement statique) et non les

mouvements "vrais", effectifs des solides: d'où la nécessité se définir les grandeurs physiques dans des référentiels.

3- Une vitessse relative de glissement nulle

Reconnaître parmi toutes les situations où des solides se déplacent dans un référentiel donné celles pour lesquelles la vitesse relative de glissement au contact d'un solide par rapport à l'autre est nulle: reconnaître donc qu'il existe des situations de "mouvement" ("où tout bouge") pour lesquelles cette vitesse est nulle.

4- Frottement solide et vitesse relative de glissement

a) frottement statique: associer le phénomène de frottement statique à des situations physiques pour lesquelles la vitesse relative de glissement des zones de contact des solides concernés les unes par rapport aux autres est nulle.

Il faut cependant faire attention à ne pas attribuer un frottement statique à toute situation physique où cette vitesse est nulle, comme celle par exemple des solides au repos et sur lesquels aucune force extérieure n'est exercée.

b) frottement cinétique: associer le phénomène de frottement cinétique à des situations où obligatoirement la vitesse relative de glissement au contact n'est pas nulle. Il faut noter qu'une vitesse relative de glissement non nulle n'implique pas forcément un frottement cinétique non nul, puisque l'on peut avoir une vitesse relative de glissement différente de zéro avec un frottement nul.

5- Les lois du frottement solide sec

a) frottement cinétique-frottement statique: des lois distinctes

Les lois, pour les deux types de frottement sont très différentes. Pour des solides donnés, des surfaces et des mouvements donnés (dans un référentiel donné), les forces de frottement cinétique exercées sur chaque surface en contact sont parfaitement définies en norme et sens alors que les forces de frottement statique sont inconnues a priori. En effet, ces dernières, en s'adaptant aux tensions locales au niveau du contact, dépendent des autres forces en jeu. En particulier le sens de ces forces, contrairement aux forces de frottement cinétique, n'est pas déterminé à l'aide de la seule donnée des mouvements effectifs des solides concernés.

b) force de frottement: force résistante au mouvement?

Une force de frottement, par définition, ne s'oppose pas toujours au "mouvement" des solides concernés, mais soit au mouvement relatif de glissement au contact des solides les uns par rapport aux autres (force de frottement cinétique), soit à

l'éventuel mouvement de glissement relatif au contact des solides les uns par rapport aux autres qui se produirait en absence de frottement (frottement statique). Ainsi, ces forces peuvent toutes les deux avoir un rôle de force motrice.

A la lecture de cette longue liste, on peut se demander s'il faut enseigner les frottements solides, et si oui, à partir de quand: au lycée, à l'université?

Première remarque: il est apparemment difficile de ne pas du tout parler de frottement solide: il suffit de regarder les programmes du secondaire et les intentions pédagogiques des différents promoteurs de programme. L'enseignement doit être près de la vie quotidienne et la mécanique de notre vie quotidienne est évidemment une mécanique avec frottement. De plus, c'est l'occasion de pouvoir trouver des exemples de forces qui ne dérivent pas d'un potentiel et de systèmes dont l'énergie mécanique n'est pas conservée.

Deuxième remarque: si on doit parler de frottements solides, autant en parler correctement sans escamoter les lois (celles qui concernent les forces) qui régissent ces phénomènes. En effet, les difficultés mathématiques sont limitées, dès lors qu'on néglige les phénomènes de roulement, de basculement et de pivotement: il suffit de savoir identifier des forces, appliquer les lois de Newton et calculer des accélérations. Il n'y a pas besoin de torseurs, d'équations différentielles, de calcul intégral etc...Si on doit parler de frottement solide, autant introduire toutes les lois que nous avons abordées dans cette étude: le niveau de discussion devra être adapté au niveau d'enseignement et non des lois étudiées.

Troisième remarque: l'enseignement des frottements solides est l'occasion de faire prendre conscience aux élèves et étudiants de plusieurs nécessités: nécessité de savoir dans quel référentiel un mouvement est défini, nécessité de tenir compte de la loi des actions réciproques, nécessité d'appliquer les autres lois de Newton...

Les suggestions qui suivent sont aussi un plaidoyer en faveur d'un enseignement plus complet sur ces phénomènes car c'est une occasion merveilleuse de faire de la physique, sans faire plein de calculs, tout en étant obligé de rester rigoureux et cohérent. Nous allons expliciter, en proposant des types d'activités, quelques uns des points qui nous paraissent importants.

1- Distinguer les situations physiques pour lesquelles il existe un frottement cinétique de celles où il existe un frottement statique ou un frottement nul.

C'est sans doute l'un des points les plus délicats, puisque cela implique de savoir reconnaître les situations physiques pour lesquelles la vitesse relative de glissement au

contact des solides concernés est nulle. Cela implique aussi de se rendre compte de la nécessité de définir les mouvements dans des référentiels.

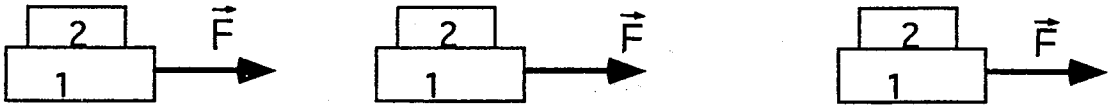
a) frottement du point de vue de la vitesse relative de glissement

Il nous faut distinguer les situations de translation pures de celles où il y a de la rotation.

a1) situations de translation pure

Considérons les situations avec deux blocs posés l'un sur l'autre, le tout posé sur une table horizontale. On applique une force sur l'un des solides. Nous pouvons nous trouver dans trois cas différents schématisés sur la figure ci-dessous:

frottement statique	frottement statique	frottement cinétique
$(\vec{v_1})_2 = \vec{0}$	$(\vec{v_1})_2 = \vec{0}$	$(\vec{v_1})_2 \neq \vec{0}$



$(\vec{v_1})_T=(\vec{v_2})_T = \vec{0}$	$(\vec{v_1})_T=(\vec{v_2})_T \neq \vec{0}$	$(\vec{v_1})_T \neq (\vec{v_2})_T$
		$(\vec{v_1})_2 = -(\vec{v_2})_1 \neq \vec{0}$

Pour les deux premières, les deux blocs sont au repos l'un par rapport à l'autre et les points de contact restent les mêmes au cours du temps: ce sont des situations de frottement statique puisque la vitesse relative de glissement au contact d'un solide par rapport à l'autre est nulle et, même si, dans le deuxième cas, les deux blocs se déplacent par rapport à la table. Le troisième est une situation de frottement cinétique, car l'un des solides se déplace en glissant par rapport à l'autre et la vitesse relative de glissement est non nulle.

Cet exemple très simple des deux blocs présente de nombreux avantages: il permet de distinguer les situations de frottement statique de celles de frottement cinétique. Il permet, de plus, de prendre conscience que, ce qui importe dans les phénomènes de frottement, c'est la vitesse <u>relative</u> de <u>glissement</u> au niveau du <u>contact</u> et que les situations de frottement statique ne supposent pas que les deux solides en contact soient au repos dans le référentiel dans lequel la situation est décrite.

a2) cas où il y a une rotation

C'est de loin les situations les plus difficiles, car il n'est pas simple de montrer et/ou de faire comprendre que, lorsqu'un solide roule sans glisser sur une surface avec laquelle il est en contact, la vitesse relative de glissement au contact est nulle. Il faut arriver à faire comprendre que, bien que le solide ait un mouvement (il roule en se translatant) et que les points de contact du solide avec la surface changent au cours du

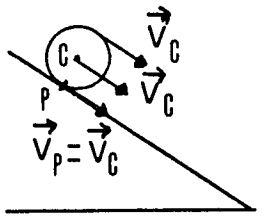
mouvement, la vitesse relative de glissement au niveau du contact est nulle et le frottement statique.

Il est envisageable cependant d'étudier deux situations de frottement nul pour lesquelles la vitesse relative de glissement est différente de zéro: une roue qui est poussée et ne fait que se translater (et donc ne tourne pas) et une roue qui tourne, en faisant du sur-place et de comparer ces situations à celle où la vitesse relative de glissement nulle au point de contact correspond à un mouvement de roulement sans glissement. L'étude comparative peut peut-être aider les étudiants à prendre conscience qu'un mouvement de roulement sans glissement d'un solide sur un autre est compatible avec une vitesse relative de glissement nulle (et donc un frottement statique), puisque cette vitesse concerne exclusivement la vitesse des surfaces de contact les unes par rapport aux autres.

Ces deux situations peuvent être étudiées, de façon qualitative et de façon expérimentale. Prenons, par exemple, un cylindre posé sur un plan incliné. Si on lâche le cylindre du haut du plan incliné et si le frottement est nul, ce cylindre a un mouvement de translation et glisse sans tourner (le moment du poids par rapport au centre de masse étant nul). Si le solide glisse vers le bas du plan incliné sans tourner, son point de contact avec le plan est toujours le même: ce point se déplace à la même vitesse que celle du centre de masse du solide, ce qui implique une vitesse relative de glissement différente de zéro. Lorsqu'il y a un frottement statique, il existe une force de frottement exercée sur le cylindre et le cylindre roule sans glisser: le solide se déplace en tournant vers le bas du plan et c'est parce que les points de contact du solide avec le plan changent au cours du mouvement que la vitesse relative de glissement au point de contact peut être nulle.

translation pure

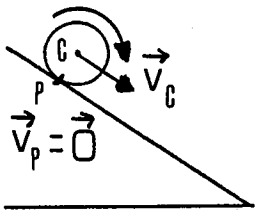
$\omega = 0$



frottement nul

roulement sans glissement

$\omega \neq 0$



frottement statique

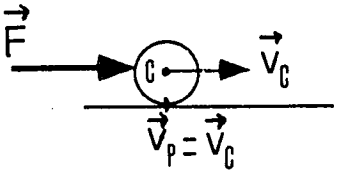
On peut, à titre d'illustration, prendre une bille d'enfant bicolore (une moitié rouge, une moitié bleue) et la lâcher du haut d'un plan incliné de glace: on constate que si la partie rouge était vers le haut au départ, elle le reste: la translation de cette bille est très visible. Si, maintenant, on la lâche du haut d'un plan incliné non lisse, on constate que la bille roule sans glisser, ce qui se manifeste par l'alternance des couleurs bleue et rouge.

Il est également possible d'obtenir le même type de résultat avec une roue (sphère ou cylindre) que l'on pousse sur une surface plane et horizontale, dans le cas d'un

frottement nul (là encore, on peut pousser une bille sur un bloc de glace) ou dans le cas d'un frottement statique.

translation pure

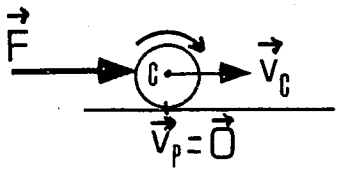
$\omega = 0$



frottement nul

roulement sans glissement

$\omega \neq 0$

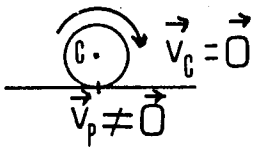


frottement statique

Là encore, il est possible de prendre une petite voiture que l'on pousse alors qu'elle est sur de la glace ou sur un sol non lisse.

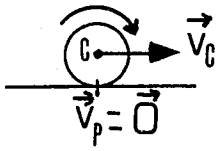
Considérons, maintenant, le cas des roues motrices d'une voiture: si le frottement est nul, les roues au démarrage "patinent" sur le sol et si le frottement est statique, la voiture roule sans patiner. Dans les deux cas, les points de contact de la roue avec le sol changent au cours du mouvement de rotation de la roue. La différence entre ces deux situations est la suivante: dans le premier cas, la voiture ne se déplace pas (la vitesse du centre de masse est nulle), alors que dans le deuxième cas, la voiture avance. Cette comparaison devrait aider les étudiants à mieux cerner ce concept de vitesse relative de glissement, en prenant conscience qu'il s'agit d'une vitesse au niveau du contact .

Frottement nul



" sur-place"

Frottement statique



"roulement sans glissement"

On peut, à titre d'illustration, prendre une voiture téléguidée (ou à friction), la poser sur de la glace (si nous n'avons pas de glace, on peut poser des gouttes d'huile sur la surface) et de s'apercevoir qu'elle ne "roule" pas, puis la faire rouler sur un sol "normal". A partir de là, on peut jouer avec des situations de frottement nul et de frottement statique. L'étude de ces deux situations physiques devrait non seulement permettre de mieux distinguer les situations avec et sans glissement relatif; mais aussi de se rendre compte de l'importance que peut avoir cette vitesse relative de glissement , en particulier lorsque les solides se déplacent sans glisser. Par ailleurs, cet exemple permet d'illustrer le fait qu'une voiture arrive à se déplacer sans glisser parce qu'il existe un frottement statique entre les roues et le sol et non seulement parce que le moteur est en marche.

b) le frottement du point de vue des lois du frottement

b1)sens des forces par rapport aux mouvements donnés

Dans les situations de frottement statique, il nous paraît judicieux de faire chercher, lorsque c'est possible, le sens des éventuels mouvements qui se produiraient en absence de frottement pour en déduire le sens des forces de frottement statique. A l'aide des exemples précédemment cités (les deux blocs, les roues motrices et porteuses d'une voiture poussée ou au démarrage), il est aisé de montrer que le sens de la force de frottement statique qui s'exerce sur le solide étudié n'est pas déterminé par le sens des mouvements donnés: elle dépend des forces en jeu dans les différentes situations physiques étudiées, puisque les tensions locales au niveau du contact sont différentes d'une situation à l'autre. Cette approche assez "qualitative" n'interdit pas, si le public auquel on s'adresse a les connaissances suffisantes, de faire aussi écrire les équations dynamiques afin de trouver la valeur de cette force.

La comparaison de ces situations avec des situations simples de frottement cinétique (cas d'un et de deux blocs par exemple) devrait permettre d'illustrer la différence qui existe au niveau des lois entre les deux types de frottement.

b2) Force de frottement = force résistante et/ou motrice

Les exemples qui précèdent illustrent bien le fait qu'une force de frottement en s'opposant, au niveau des contacts, à une vitesse **relative** de glissement ou à une éventuelle vitesse **relative** de glissement, peut être motrice, et nous aurions tort de nous en priver. C'est l'occasion d'insister sur l'importance des mouvements relatifs, dans tout phénomène de frottement. C'est également l'occasion d'analyser un certain nombre de phénomènes quotidiens, comme celui de la marche.

2 - la loi des actions réciproques

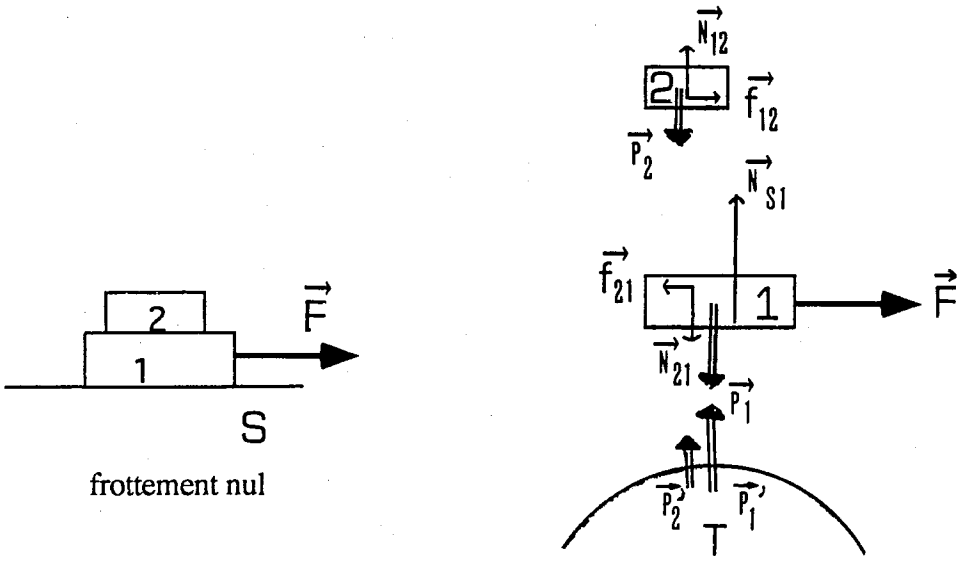
a) les schémas éclatés

Il nous paraît extrêmement important d'habituer les étudiants à faire des schémas éclatés tels que les a introduit L. Viennot, en insistant sur les points suivants:

- quand une force s'exerce sur un objet, cette force a toujours un partenaire (quelle soit ou non une force de contact) qu'il est fortement conseillé de ne pas oublier de dessiner (l'usage de craies ou crayons de couleur est spécialement indiqué, car permet d'attribuer la même couleur à chaque couple de forces et, donc, de ne pas en oublier)

- les forces de contact verticales et horizontales s'exercent **sur** chaque solide en contact (même si ces forces sont localisées à l'interface) et, ceci, quelle que soit la position des solides les uns par rapport aux autres (au dessus ou au dessous). Il nous paraît prudent, compte tenu des résultats de cette enquête, de localiser chacune de ces forces sur chaque solide en un point voisin de l'interface et non sur l'interface, afin

d'éviter que cet interface ne soit perçu comme un objet ayant une existence propre. Sur la figure ci-dessous, nous avons dessiné toutes les forces s'exerçant sur deux blocs posés l'un sur l'autre. Une force est appliquée sur le bloc inférieur et l'ensemble des deux blocs reposent sans frottement sur une table horizontale.



Cet éclatement des schémas présente de nombreux avantages: ne pas oublier de forces (surtout si, à chaque couple correspond une couleur particulière), pouvoir trouver ou expliquer le mouvement de chacun des solides étudiés en faisant l'inventaire de toutes les forces qui s'exercent sur chacun d'eux et donc ensuite appliquer la deuxième loi de Newton, ne pas prendre la mauvaise composante normale pour calculer la force de frottement à l'aide de la formule $f = \mu N$ (cf. partie exploratoire).

b) phénomène de frottement et force de frottement

Nous avons constaté que les étudiants caractérisaient le phénomène de frottement par une force unique attachée à l'interface et n'agissant souvent que sur un seul objet. Ainsi, nous avons constaté que très souvent le phénomène qui intervient entre les solides en contact est associé à la force par laquelle on représente habituellement le phénomène. L'obligation de faire des schémas éclatés devrait amener les étudiants à associer systématiquement au phénomène de frottement deux forces et non une seule, chacune de ces forces s'exerçant sur chacun des solides en contact.

3- Le langage utilisé

Cette étude a permis de voir que certains termes utilisés pour désigner le type de frottement ainsi que les forces de frottement participent à renforcer les idées des étudiants sur le frottement. Nous trouvons trois types de termes:

- ceux qui désignent les forces de frottement cinétique comme " *force de résistance au glissement*" ou " *force de freinage*" ou "*force de résistance*" ou "*résistance*

au glissement" Ces termes empêchent d'imaginer qu'une force de frottement puisse être motrice et induisent même qu'elle s'oppose dans l'absolu. Pourquoi ne pas les appeler simplement forces de frottement cinétique ou encore forces de frottement de glissement?

- ceux qui désignent le frottement statique comme "*le frottement de repos*" ou " *frottement d'adhérence*" ou "*adhérence*" . Ces termes, tout comme celui de frottement statique, laissent penser que le phénomène de frottement *statique* n'existe que lorsque les solides en contact sont au repos l'un par rapport à l'autre et donc n'existe pas lorsque l'un des solides est en mouvement par rapport à l'autre. Pourquoi ne pas utiliser le terme de frottement de non glissement pour désigner le frottement statique?

- le terme de vitesse de glissement. Ce terme est très commode et indique bien qu'il y a un glissement; mais l'adjectif relatif y est absent. Or, cet adjectif est essentiel: il est même difficile de dire lequel de "relatif" ou de "glissement" est le plus important. En tous cas, il ne coûte pas trop d'appeler cette vitesse, vitesse relative de glissement.

En conclusion, nous résumons les propriétés essentielles des deux types de forces de frottement solide sec afin de mettre en évidence leurs différences.

	Frottement de glissement (cinétique)	Frottement de non glissement (statique)
Vitesse relative de glissement au niveau du contact	Vitesse **relative** de **glissement** non nulle	Vitesse **relative** de **glissement** nulle
Propriétés des forces de frottement	Force bien **définie**, pour une vitesse relative de glissement donnée Force pouvant être **motrice**	Force "**imprévisible**", dépend des forces en jeu en s'adaptant aux tensions locales au niveau du contact Force pouvant être **motrice**
Sens des forces	opposé à la vitesse **relative** de **glissement**	opposé à l'éventuelle vitesse **relative** de **glissement,** en absence de frottement
Norme des forces	$f_c = \mu_c N$	$0 < f_s \leq f_{smax} = \mu_s N$

CONCLUSION

Au terme de ce travail, récapitulons les principales étapes ainsi que les résultats obtenus.

Une enquête préliminaire et une "analyse a priori" ont permis, dans un premier temps, de dégager quelques hypothèses de travail. L'étude des frottements de glissement et de non-glissement des solides du point de vue de la physique et du point de vue didactique ainsi que l'enquête préliminaire (constituée d'observations de classe très empiriques, d'une pratique enseignante et d'une mini-enquête) a montré que les difficultés rencontrées par les étudiants se focalisaient sur:

- l'attribution d'un sens aux forces de frottement cinétique sans aucune référence aux mouvements relatifs de glissement des zones de contact des solides;
- l'attribution d'un sens bien défini aux forces de frottement statique, sens déterminé par celui du mouvement donné de chacun des solides (sans référence à un éventuel mouvement relatif de glissement des solides en contact en absence de frottement);
- la réduction des actions de contact entre deux solides à une seule composante tangentielle et à une seule composante normale aux surfaces en contact, composantes qui n'agissent que sur le solide qui se trouve au dessus de la surface de contact;
- la localisation de cette force (ou ces forces) en un point de l'interface.

La deuxième étape concerne tout ce qui a trait au recueil de données: construction de quatre questionnaires ayant pour objectifs de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses et/ou d'en affiner d'autres, passation de ces quatre questionnaires auprès d'une population variée, tant par sa culture et langue d'origine que par son niveau d'études et, enfin, analyse des résultats. Cette analyse a permis d'expliciter un modèle étudiant du frottement solide, modèle qui rend compte de l'ensemble des résultats, résultats obtenus lors de l'étude de situations physiques où les solides étudiés sont tous deux mobiles dans un référentiel donné. Ce modèle a les caractéristiques suivantes:

- Le phénomène du frottement entre deux solides en contact est représenté par une résultante unique des forces de contact (non application de la troisième loi de Newton),

localisée en un point de l'interface ("entre les solides") et qui n'agit que sur le solide qui se trouve au dessus de l'interface (effet D-D);

- Cette force unique a un sens bien défini, déterminé par le sens des mouvements donnés (effectifs) des solides étudiés (non distinction entre les lois du frottement cinétique et celles du frottement statique); cette force s'oppose toujours aux mouvements "vrais" des solides, sans référence aux mouvements relatifs de glissement de zones de contact des solides les unes par rapport aux autres (frottement cinétique) ou à leurs éventuels mouvements relatifs de glissement en absence de frottement (frottement statique), (les mouvements relatifs des solides ne sont pas pris en compte);

- Le frottement fonctionne comme s'il existait entre les solides en contact un lien qui assure une certaine "adhérence" entre les solides en contact, "adhérence" qui permet d'une part à un solide passif d'être entraîné (par le solide "moteur") sans qu'aucune force dans le sens du mouvement ne s'exerce explicitement sur lui (effet d'entraînement) et qui, d'autre part, freine le solide sur lequel la force de frottement agit (effet résistif: il est impossible que la force de frottement ait un rôle moteur). Ainsi, les caractéristiques "d'adhérence" de surfaces en contact des solides, généralement associées à des situations de non glissement, sont transférées aux cas de glissement (non distinction entre frottement statique et cinétique).

Les étudiants ne distinguent pas vraiment ce que l'on appelle le phénomène de frottement entre deux solides en contact des forces représentant ce phénomène. Cette indifférenciation est nette au niveau du langage, puisque les termes de frottement et de forces de frottement sont utilisés indifféremment l'un pour l'autre. Ainsi, on peut rencontrer des phrases du type: " *le frottement, c'est la force*". Cette indifférenciation ne se manifeste pas uniquement au niveau du langage. En effet, l'existence **d'un** frottement **entre** deux solides en contact correspond, pour les étudiants, à une force de frottement **unique** localisée **entre** les solides en contact (en un point de l'interface) ainsi qu'à une seule force normale, forces qui n'agissent que sur un seul solide, celui qui se trouve au-dessus de l'interface, et non à deux forces de frottement et deux forces normales s'exerçant chacune sur chacun des solides en jeu.

En résumé, tout se passe comme si, il existait, pour les étudiants, un phénomène unique de frottement perçu comme un "lien" (quelquechose qui existe entre les solides en contact et qui "adhère" plus ou moins), phénomène qui ne se distingue pas vraiment de la force de frottement unique par laquelle ce phénomène est représenté. Ainsi, la force de frottement (cinétique et statique) obéit à une loi de Coulomb aménagée où le caractère "imprévisible" ou "adaptable" des forces de frottement statique n'est pas pris en compte, où le sens des forces de frottement (statique et cinétique), pour des mouvements de solides donnés, est parfaitement défini, où les mouvements considérés sont les mouvements "vrais", voire donnés des solides et non les mouvements relatifs de

glissement des surfaces en contact ou leurs éventuels mouvements relatifs de glissement et où, enfin, une force de frottement ne peut pas avoir un rôle de force motrice, puisqu'elle résiste toujours, pour les étudiants, au mouvement ("vrai" ou donné) du solide étudié.

Une troisième étape a été consacrée à l'étude critique d'un assez grand nombre de manuels de différents types d'enseignements (secondaire, technique et supérieur) sur des points précis, en relation avec tout ce qui précède. Cette étude montre que les manuels n'aident pas vraiment les étudiants à remettre en cause leurs idées sur le frottement solide sec, et même très souvent contribuent à renforcer leur modèle sur ce phénomène. La majorité des manuels a choisi de parler de frottement solide sans en parler vraiment ou d'en parler en simplifiant au maximum ou encore en restant dans une certaine ambigüité sur des points pourtant fondamentaux. Nous avons, en effet, constaté que:

- les frottements cinétique et statique ne sont pas nettement distingués l'un de l'autre, puisque les différences affichées entre les lois qui régissent ces deux types de frottement sont assez ambigües, voire similaires, ce qui conduit à réduire ces deux types de frottement à un seul phénomène de frottement.
- les situations de frottement cinétique sont associées à des situations de mouvement dans un référentiel donné et les situations de frottement statique à des situations de repos dans ce référentiel, ce qui ne permet absolument pas de penser qu'il peut exister des situations où les deux solides sont en mouvement dans un référentiel donné et pour lesquelles le frottement est statique.
- les forces de frottement (cinétique et statique) s'opposent toujours au mouvement donné du solide étudié. Ceci se manifeste soit au niveau du discours ("*par définition, une force de frottement s'oppose*"), soit au niveau des exemples choisis (dans ces exemples, la force de frottement s'oppose toujours au mouvement donné du solide), soit au niveau des exercices proposés.
- le caractère "imprévisible" des forces de frottement statique est totalement absent du discours et des exercices proposés.
- le frottement entre des solides en contact est habituellement représenté par une seule résultante des actions de contact, localisée à l'interface de contact des solides et s'exerçant sur le solide étudié qui se trouve toujours au dessus de cet interface.

La dernière étape de ce travail concerne quelques suggestions pédagogiques qui sont aussi un plaidoyer en faveur d'un enseignement plus complet et moins ambigü sur le frottement de glissement et de non-glissement solide sec. En effet, indépendamment des lois propres au frottement, un enseignement sur les phénomènes de frottement permet d'insister sur des aspects extrêmement importants de la physique qui posent quelques problèmes aux étudiants: application des lois de Newton (en particulier la troisème ou loi

des actions réciproques), localisation des forces sur le "bon" solide, la nécessité de définir des mouvements dans des référentiels et savoir reconnaître des situations pour lesquelles la vitesse relative de glissement des surfaces en contact est nulle.

Ce travail est certes incomplet et demande des études approfondies sur un assez grand nombre de thèmes. Il faut le considérer comme un point de départ qui permet de définir un certain nombre d'axes de recherche. Citons-en quelques uns:

- définir une séquence d'enseignement sur le frottement de glissement et de non-glissement solide et l'évaluer, en s'appuyant sur les résultats de ce travail et certaines de nos suggestions pédagogiques. Cette proposition peut être double: l'une pour l'enseignement secondaire, l'autre pour l'enseignement supérieur.

- étudier les lois du frottement statique dans des situations de repos relatif. Seuls quelques étudiants brésiliens ont été intérrogés; mais ce fut au cours de notre enquête exploratoire. Le sujet mérite qu'on s'y attarde un peu et il nous semble intéressant d'étudier plusieurs types de situations: cas d'un solide au repos sur une surface horizontale et/ou inclinée; cas de deux ou trois solides en mouvement dans un référentiel donné et en repos relatif; cas d'un solide qui reste accroché à un mur. Enfin, envisager également des situations où le mouvement donné des deux solides en contact n'est plus un mouvement rectiligne, par exemple, le cas d'une pastille se trouvant sur un disque qui tourne et qui est au repos par rapport au disque.

- voir ce que deviennent les effets DD et d'entraînement lorsque le solide étudié a un mouvement dans un plan vertical.

- approfondir cette notion de vitesse relative de glissement nulle et non nulle des surfaces en contact dans des situations de frottement statique, cinétique et même de frottement nul afin de mieux comprendre les difficultés rencontrées par les étudiants et soulevées au cours de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G., 1938. La formation de l'esprit scientifique. Vrin, Paris (1983).

- CAMPA A., CHAPERT R. et PICARD R., 1969. La mécanique par les problèmes: Statique. Fouché, Paris.

- CLOSSET J-L, 1983. Le raisonnement séquentiel en électrocinétique. Thèse d'état, Paris 7.

- DRIVER R. and BELL B., 1985. Student's thinking and the learning of science: a constructivist view. School Science Review, 67(240): 445-456.

- DRIVER R., 1989. Student's conceptions and the learning of science. Int. J. of Science Education, 11(special issue): 481-490.

- DUCHL RICHARD A. et GITOMER DREW H., 1991. Epistemological perspectives of conceptual change: implications for educational practice. Journal of Research in Science Teaching, 28(9): 839-858.

- DUMAS-CARRE A., 1987. La résolution de problèmes en physique au lycée; le procédural: apprentissage et évaluation. Thèse d'état, Paris 7.

-GENIN C., MICHAUD-BONNET J. et PELLET A., 1987. Représentations des élèves en mathématiques et en physique sur les vecteurs et grandeurs vectorielles lors de la transition collège-lycée. Petit X, 14-15: 39-63.

- GERSTEN J., SOODAK H. et TIERSTEN M. S., 1992. Unexpected motions of balls. American Journal of Physics, 60(1): 43-47.

- GIL-PEREZ D. et CARRACOSA-ALIS J., 1992. Approaching pupils' learning to scientific construction of knowledge: some implications of the history and philosophy of science in science teaching. Second International HPS&ST Proceedings, 376-389.

- GIORDAN A. et VECHI G., 1987. Les origines du savoir. Delachaux-Niestlé, Paris.

- GOFFARD M., 1990. Modes de travail pédagogique et résolution de problèmes. Thèse, Paris 7.

- HEWSON P. W., KENNETH M. Z., TABACHNICK B. R., BLOMKER K. B. ET TOOLIN R., 1992. A conceptual change approach to science teacher education at the university of Wisconsin-Madisson. Annual meeting of the American Education Research Association, San Francisco, Ca.

- JOHSUA S.et DUPIN J. J. 1993. Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. Presses Universitaires de France, Paris.

- LEGRAND F., 1988. Travail de tutorat dans le cadre d'un projet d'enseignement de l'énergie en classe de première scientifique au L.I.R.E.S.T., Paris 7.

- MAURINES L., 1986. Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques: étude des difficultés des étudiants. Thèse, Paris 7.

- MENINGAUX J., 1986. La schématisation des interactions en classe de 3°. BUP n° 683: 761-778.

- MILLAR R., 1989. Constructive criticisms. Int. Journal of Science Education, 11: 587-596.

- NOVAK J., 1985. Metalearning and metaknowledge strategies to help students learn how to learn. Cognitive Structure and Conceptual Change. Acad. Presse Inc., London.

- OGBORN J. and GUTIERREZ R., 1992. A causal framework for analysing alternative conceptions. Int. Journal of Science Education, 14(2): 201-220.

- OSBORN and WITTROCK, 1983. Learning science: a generative process. Science Education, 67(4): 489-508.

- PIAGET J. et INHELDER B., 1941. Le dévelopement des quantités physiques chez l'enfant. Delachaux-Niestlé, Neufchatel.

- POSNER J., STIKE K., HENSON P. et GERTZOG W., 1982. Accomodation of a scientific conception: toward a theory of a conceptual change. Science Education, 66(2): 211-227.

- ROZIER S., 1988. Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique. Thèse, Paris 7.

- SALAZAR A., SANCHEZ-LAVEGA A. et ARRIANDAGA M. A., 1990. Is the frictional force always opposed to the motion?.Physics Education, 25: 82-85.

- SALTIEL E., 1978. Concepts cinématiques et raisonnements naturels: étude et compréhension des changements de référentiels par les étudiants en sciences. Thèse d'état, Paris 7.

- SALTIEL E., MALGRANGE J-L., 1979. Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. BUP n° 616: 1326-1335.

- SALTIEL E., 1992. De l'intérêt de la didactique de la physique et de l'histoire de la physique dans la formation d'enseignants. Journées d'études annuelles de la société d'histoire des sciences et de technique.

- SALTIEL E., 1993. Une recherche d'équipe en didactique de la physique. Conférence I.U.F.M., Paris.

- SEBASTIA Y, 1989. Misconceptions, metaphors and conceptual change: once more with feeling. International Journal of Science Education, 115(4): 364.

- SHAW DONALD E., 1979. Frictional force on rolling objets. American Journal of Physics, 47(10): 887-888.

- VIENNOT L., 1977. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Thèse d'état, Paris 7.

- VIENNOT L., 1979. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Hermann, Paris.

- VIENNOT L., 1986. Mécanique et énergie pour débutants. L.D.P.E.S. - I.R.E.M..

- VIENNOT L., 1989. Bilan des forces et loi des actions réciproques. Analyse des difficultés des élèves et les enjeux didactiques. BUP n° 716: 951-969.

- WEHRBEIN WILLIAM M., 1992. Frictional forces on a inclined plane. American Journal of Physics, 60(1): 57-58.

Manuels

L- Secondaire

L-1 BECQUELIN M. ,BECQUELIN Th. et DANAIREU U., 1978.
Physique seconde. Bordas, Paris.

L-2 BECQUELIN M. ,BECQUELIN Th. et RUYTOOR M., 1972.
Terminale C et E. Bordas, Paris.

L-3 BOURDON R. et BOURQUARD C., 1987.
Physique seconde. Delagrave, Paris.

L-4 BOURDON R. et BOURQUARD C., 1988.
Physique 1ère S et E. Delagrave, Paris.

L-5 BRAMAND P., FAYE Ph. et THOMASSIER G., 1983.
Physique terminales C et E. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.

L-6 BRAMAND P., FAYE Ph. et THOMASSIER G., 1988.
Physique 1ère S et E. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.

L-7 BRAMAND P., BAUTRANT R., FAYE Ph. JAUBERT A. et THOMASSIER G.,
1988. Physique seconde. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.

L-8 DEGURSE A.M., GOZARD F. ,ROSENFELD-GIPCH L. et SOULIE L., 1987
Physique seconde. Hatier, Paris

L-9 DEGURSE A.M., GOZARD F. ,ROSENFELD-GIPCH L. et SOULIE L., 1989
Physique terminale D. Hatier, Paris.

L-10 DUMIELLE J.C. , LEGRAND J.C. et MERCIER B. , 1988.
Physique 1ère S et E. Belin, Paris.

L-11 DUMIELLE J.C. , LEGRAND J.C. et MERCIER B. , 1988.
Physique terminale D. Belin, Paris.

L-12 PENIGAUD A. , QUARANTA L. , ROUSSEAU A. et CUNY B. , 1987.
Physique seconde. Collection G.G.E.. Magnard, Paris.

T- Technique

T-1 AGATI P. et MATTERAN N., 1983.
Mécanique 1ère F. Collection Durrande. Technique & vulgarisation, Paris.
(1ère F_1, F_2, F_3, F_4, F_9, F_{10})

T-2 AGATI P. , DELVILLE G. et MATTERAN N.. 1989.
Mécanique. Modélisation/cinématique/statique.
Du cours aux applications industrielles. Collection Agati. Bordas, Paris.
(baccalauréats technologiques et formation continue)

T-3 AGATI P. , DELVILLE G. et MATTERAN N. , 1989
Mécanique. Résistance des matériaux; dynamique/ énergétique. Mécanique des fluides. Thermique.
Du cours aux applications industrielles. Collection Agati. Bordas, Paris.
(baccalauréats technologiques et formation continue)

T-4 AGATI P. et MATTERAN N., 1990.
Mécanique appliquée. Résistance des matériaux. Mécanique des fluides. Thermodynamique. Dunod, Bordas, Paris.
(IUT, classes de techniciens supérieurs, classes préparatoires des lycées techniques)

T-5 AGATI P. , BREMONT Y. et DELVILLE G., 1986.
Mécanique du solide. Applications industrielles. Dunod, Bordas, Paris.
(IUT, classes de techniciens supérieurs, classes préparatoires des lycées techniques)

T-6 BUHOT G. et THUILLIER P., 1967.
Cours de mécanique 1: Statique. Masson et Cie, Paris.
(Enseignement technique supérieur)

T-7 BUHOT G. et THUILLIER P., 1973.
Cours de mécanique 4: Dynamique. Masson et Cie, Paris.
(Enseignement technique supérieur)

S- Supérieur

S-1 ALONSO M. et FINN E. J., 1970.
Physique générale, Tome 1. Editions du renouveau pédagogique, Inc, Montréal.

S-2 ANNEQUIN et BOUTIGNY, 1972.
Cours de physique. Mécanique 2. 1er cycle universitaire et mathématiques supérieures . Vuibert, Paris.

S-3 BOK J. et MOREL P., 1968.
Cours de physique Mécanique; Ondes. Collection Méthodes. Hermann, Paris.

S-4 CHAMPEAU R. , DELSART C. , CAMUS P. , FONTES P. et KAREC F.
Cours de physique. Mécanique Université Paris-Sud.
Publications Universitaires Scientifiques, Service de publications d'Orsay, Paris.

S-5 GIE H. et SARMANT Y., 1985.
Mécanique, volume 2. Collection Sciences physiques. Lavoisier, Paris.

S-6 KANE Y. et STERNHEIM, 1986.
Physique. Université de Massachusetts. Interéditions, Paris.

S-7 Le BELLAC M., 1985.
Introduction à la mécanique. Belin, Paris.

S-8 PEREZ J. Ph., 1984.
Mécanique du point matériel. Solides. Fluides. Masson, Paris.

S-9 PROVOST P. et JOYAL M., 1972. Mécanique. Colection Joyal-Provost. Masson et Cie, Paris.

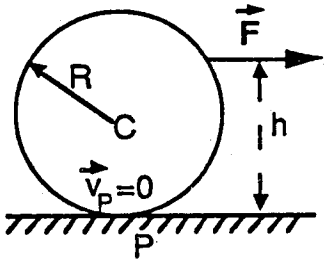
S-10 RESNICK R. et HALLIDAY D., 1979.
Mécanique Physique 1. Editions du renouveau pédagogique. Ottawa, Canada.

S-11 SCHMAUSS V., VALENTIN L., MOUCHET M. et DEDONDER J.-P., 1989.
Exercices de mécanique. Collection Méthodes. Hermann, Paris.

S-12 SOUTIF J. , 1971.
Mécanique du point matériel. Dunod, Paris.

S-13 STRELKOV S. , 1978.
Mécanique. Editions MIR, Moscou.

ANNEXE



La relation qui donne la vitesse d'un point du solide en fonction de celle d'un autre point du solide est:

$$\vec{v}_C = \vec{v}_P + \vec{\omega} \wedge \vec{PC}$$

où $\vec{v}_C$ est la vitesse du centre de masse "C" du solide, $\vec{v}_P$ est la vitesse du point de contact "P" du solide par rapport à la surface sur lequel il repose et $\vec{\omega}$ est le vecteur vitesse angulaire de rotation . Comme le solide roule sans glisser sur la surface horizontale, $\vec{v}_P$ est nul et le frottement entre le solide et le plan de contact est donc statique.

Ainsi, $v_C = \omega r$ et $a_C = \alpha r$ où α est l'accélération angulaire de rotation de la sphère.

Supposons que le sens de la force de frottement statique (f_S) exercée sur la sphère soit vers la gauche. Les équations dynamiques appliquées au solide dans le référentiel S lié à la surface horizontale sont:

(1) $F - f_S = m\, a_C$

(2) $F\,(h - r) + f_S\, r = I\, \alpha = \frac{2}{5} m\, r^2\, \alpha$

où I est le moment d'inertie d'une sphère (de masse m et de rayon r) par rapport à l'axe de rotation qui passe par C .

Des équations (1) et (2) avec $a_C = \alpha\, r$, on obtient l'expression suivante:

$$(3)\quad \mathbf{f_S = F\,(1 - \frac{5h}{7r})}$$

Trois cas se présentent:

a. Si $h = \frac{7r}{5}$, alors $f_S = 0$. La sphère roule sans glisser, avec un frottement nul.

sens de f_S	sens du mouv. de C
$f_S = 0$	$\Rightarrow$

b. Si $h > \frac{7r}{5}$, alors $fs<0$ (c'est à dire vers la droite). La sphère roule sans glisser et la force de frottement statique a le même sens que celui du mouvement du centre de masse C.

sens de f_S	sens du mouv. de C
$\Rightarrow$	$\Rightarrow$

c. Si $h < \frac{7r}{5}$, alors $f_s > 0$ (c'est à dire vers la gauche). La sphère roule sans glisser et le sens de la force de frottement statique est opposé à celui du mouvement du centre de masse C.

sens de f_s	sens du mouv. de C
$\Leftarrow$	$\Rightarrow$

En déterminant le sens de l'éventuel mouvement de glissement qui se produirait en absence de frottement, on peut vérifier que la force de frottement statique s'oppose toujours au sens de cet éventuel mouvement.

Ainsi, si le frottement entre la sphère et la surface horizontale est nul, il suffit de prendre les mêmes équations (1) et (2) avec $f_s = 0$. On obtient donc:

(4) $a_c = F/m$

(5) $\alpha = 5\,F\,(h - r) / 2\,m\,r^2$

Les équations (4) et (5) donnent: $\dfrac{a_c}{\alpha r} = \dfrac{2\,r}{5\,(h - r)}$

Trois cas peuvent se présenter:

a. Si $\frac{a_c}{\alpha r} = 1$, alors $a_c = \alpha\, r$, $v_p = 0$ et $h = \frac{7r}{5}$.

La sphère ne glisse pas: il n'y a pas d'éventuel mouvement de glissement

b. Si $\frac{a_c}{\alpha r} < 1$, alors $a_c < \alpha\, r$, $a_p < 0$ et $h > \frac{7r}{5}$.

La sphère roule et glisse et le sens de la vitesse relative de glissement du point de contact P est opposé à celui de la vitesse du centre de masse C. Par conséquent, la force de frottement statique s'opposera au sens de cet éventuel mouvement.

sens de f_s	sens du mouv. de C	sens de l'éventuel mouv.($f = 0$)
$\Rightarrow$	$\Rightarrow$	$\Leftarrow$

c. Si $\frac{a_c}{\alpha r} > 1$, alors $a_c > \alpha\, r$, $a_p > 0$ et $h < \frac{7}{5}$.

La sphère roule et glisse (sauf évidemment lorsque h=r car la sphère glisse alors sans rouler) et la vitesse relative de glissement du point de contact P a le même sens que celui de la vitesse du centre de masse C. Par conséquent, la force de frottement statique s'opposera au sens de cet éventuel mouvement.

sens de f_s	sens du mouv. de C	sens de l'éventuel mouv.($f = 0$)
$\Leftarrow$	$\Rightarrow$	$\Rightarrow$

Frictional force on rolling objects

Donald E. Shaw
Physics Department, Villanova University, Villanova, Pennsylvania 19085
(Received 27 November 1978; accepted 7 May 1979)

An experiment investigating the direction of the frictional force exerted by a horizontal surface on a rolling object is discussed. Students generally find the results surprising; however, the observations support the predictions of rotational dynamics. The experiment is suitable for an introductory mechanics laboratory.

INTRODUCTION

Presented here is an introductory mechanics experiment designed to show the direction and magnitude of the frictional force exerted on a solid cylinder rolling without slipping on a horizontal surface. Using relatively simple equipment, the acceleration of the cylinder's center of mass is measured for a range of applied torques. The frictional force is obtained directly from the observed acceleration and the application of Newton's second law to the motion of the mass center. Students discover that the frictional force may be in the opposite or the same direction as the motion of the mass center of the rolling object. For a certain value of the applied torque the magnitude of the frictional force is zero regardless of the nature of the flat surface. Since most students find these results quite surprising, this particular problem is well suited for the "discovery approach"[1] that encourages the experimental investigation of unfamiliar phenomena. Hopefully, investigators will be motivated to enquire further into the understanding of their results. They will find that the detailed application of the principles of rotational dynamics provide theoretical values for the frictional forces that are consistent with the unexpected experimental results

EXPERIMENTAL

The experimental arrangement used to determine the frictional force exerted on the rolling cylinder is depicted schematically in Fig. 1. The cylinder of radius R (6.625 cm), mass M (4755 g) and moment of inertia I (7.793×10^4 g cm^2) has seven axles of various radii at each end.[2] For clarity only one of these axles is shown in Fig. 1. Two strings wrapped around identical axles at each end of the cylinder are connected via the pulleys P to small suspended masses m (50 g) that produce the acceleration a_c of the mass center of the cylinder. The mass and moment of inertia of the cylinder are chosen to be large so that neglecting the moment of inertia of the pulleys P produces a maximum error of 0.2% for the frictional force.

The acceleration a_c is obtained by measuring the time t required for the cylinder to move from rest at A, a distance x_c, (40.1 cm) to B. This time interval is accurately recorded using a standard electronic timer.[3] Initially the cylinder is placed against a pair of metal bars fastened to the horizontal surface near A. Current passing through the bars and the metal cylinder disables the timer. When the cylinder is released the timer starts; it stops when the cylinder reaches a pair of aluminum foil strips placed at B. In Fig. 1 the electrical connections from the timer to the foil strips and metal bars are not shown, since the actual wiring will depend on the nature of the particular timer used. With this arrangement x_c can easily be measured to an accuracy of ±0.2 cm and time intervals of 2-sec duration can be recorded with a typical standard deviation of ±0.006 sec for 10 trials. The constant acceleration of the center of mass of the cylinder is

$$a_c = 2x_c/t^2. \tag{1}$$

Seven different values of a_c are computed from Eq. (1) using the same suspended mass m but different values for the radius r of the axles connected rigidly to the rotating cylinder. In each case the student must adjust the height of the pulleys P to ensure that the strings pulling the cylinder are horizontal. Also by direct observation it should be verified that slipping does not occur since this assumption will be used in the subsequent analysis.

The equation of motion of one of the masses m is

$$mg - T = ma_m, \tag{2}$$

where a_m is the acceleration of m and T is the tension in the string. The equation of motion of the mass center of the rolling cylinder is

$$2T - f = Ma_c, \tag{3}$$

where the assumed direction of the frictional force f is shown in Fig. 1 and the moment of inertia of the pulley P and frictional torques in the bearings of the pulleys P are neglected. Assuming that the string does not slip on the cylinder's axle and the cylinder does not slip on the horizontal surface, a relation between a_m and a_c can be found.

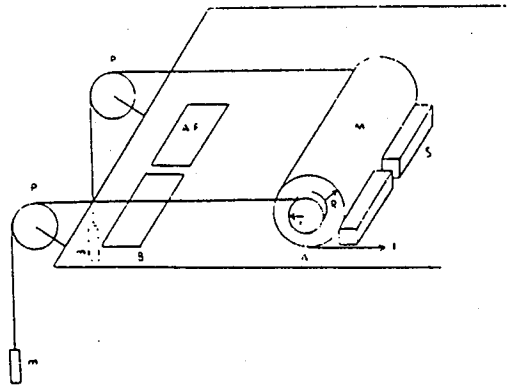


Fig. 1. Schematic representation of the experimental arrangement. The rolling object M is connected to the suspended masses m by cords. The electronic timer is activated when the cylinder loses contact with the metal rods S and is turned off when the cylinder reaches the foil strips AF. The radius of a typical axle attached rigidly to the rolling cylinder is r.

 0002-9505/79/100887-02$00.50

Table I. Tabulated experimental values of time, acceleration, and frictional force for various axle radii.

Axle radius (cm)	Time (sec)	Acceleration (cm/sec^2)	Frictional force (dyne)
r	t	a_c	f
0.76	2.285	15.3	$+2.3 \times 10^4$
1.55	2.178	16.9	$+1.6 \times 10^4$
2.34	2.086	18.4	$+0.79 \times 10^4$
3.13	1.975	20.6	-0.28×10^4
3.91	1.904	22.1	-1.1×10^4
4.67	1.818	24.2	-2.2×10^4
5.45	1.771	25.5	-2.8×10^4

If the cylinder rotates through an angle θ, and the mass m moves a distance x_m, then x_m and θ are related by

$$x_m = R\theta + r\theta, \tag{4}$$

since the distance x_c is $R\theta$. Differentiating Eq. (4) twice with respect to time and noting that the angular acceleration $d^2\theta/dt^2$ of the cylinder is a_c/R, it is found that

$$a_m = (1 + r/R)a_c. \tag{5}$$

By solving Eqs. (2), (3), and (5) to eliminate T and a_m,

$$f = 2mg - [M + 2m(1 + r/R)]a_c \tag{6}$$

is obtained. Thus, Eq. (6) yields the experimentally determined value of f in terms of known constants and the measured linear acceleration a_c. In Table I the measured values of r, t, a_c, and f are recorded. The data points with error bars plotted in Fig. 2 are the experimental values of friction with uncertainties versus the axle radius r.

The experimental data of Fig. 2 show clearly that the frictional force is in the direction opposite to the acceleration of the center of mass for the three smallest radii. However, for larger radii, the direction of the frictional force reverses and acts in the same direction as the mass center's acceleration. At this point the student should be challenged to interpret his puzzling results. If the experiment is being performed as a "discovery experiment" prior to a detailed class discussion of rotational motion, a brief physical explanation would be acceptable. The detailed consideration of the dynamics of the problem might be deferred until the subject of rotational motion has been completed. In the next section the theoretical values for the frictional force are derived in terms of the known constants m, M, I, R, and r.

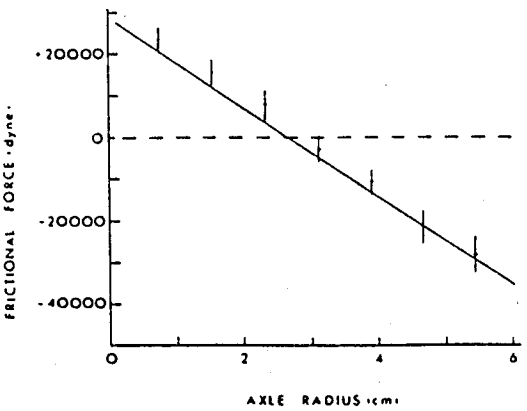


Fig. 2. Frictional force f as a function of the axle radius r. The data points are the experimentally determined values. The error bars include typical standard deviations of ±0.006 sec in the time intervals and errors of ±0.2 cm in the distance travelled by the cylinder. The errors in M and m are neglected. The solid curve shows the theoretical values obtained from Eq. (10).

DISCUSSION

The equations of translational motion for the mass m and the mass center of the rolling object are given by Eqs. (2) and (3), respectively. The equation of motion for the rotation of the cylinder about its axis of longitudinal symmetry is

$$2Tr + fR = I\alpha, \tag{7}$$

where the assumed direction of the frictional force is shown in Fig. 1 and α is the angular acceleration of the cylinder. Assuming, as before, that no slipping of the cord or the cylinder occurs, a_c and a_m are related to α by

$$a_c = R\alpha, \tag{8}$$

and

$$a_m = (R + r)\alpha, \tag{9}$$

where Eq. (9) is a direct consequence of Eq. (4). The frictional force is obtained by solving Eqs. (2) and (3) and (7)–(9):

$$F = [2mg(I - MRr)]/[I + MR^2 + 2m(R + r)^2]. \tag{10}$$

The solid curve of Fig. 2 is the theoretical value of the frictional force obtained from Eq. (10) plotted as a function of the radius r. The curve is very nearly linear since the term involving r in the denominator of Eq. (10) is very small compared to I or MR^2. The computed values of the frictional force are, in fact, consistent with the surprising experimental results. The experimental data points are shown with 68% confidence limit error bars and the theoretical curve has an uncertainty of approximately 3% arising from the fact that the moment of inertia of the rolling object was calculated from its geometry. For small values of r the torque produced by the tensions in the cords is insufficient to provide the angular acceleration required to prevent slipping. Therefore, the frictional force must act in the direction opposite to the motion of the mass center to develop the additional torque. However, for larger values of r, the torque resulting from the tension in the cords is too large and the frictional force must reverse its direction.

ACKNOWLEDGMENTS

The author wishes to thank undergraduate students M. Peastrel and P. Genuario for their assistance in the development of this experiment.

[1]See for example, L. H. Greenberg, *Discoveries in Physics* (Saunders, Philadelphia, 1975).

[2]Our cylinder was machined from aluminum with integral axles at each end. However, the cylinder could easily be constructed from other materials with separate axles of various radii that would be attached as needed.

[3]Any externally activated timing system with a time resolution of 0.001S is suitable. Our timer consisted of a Thornton Associates Model DEC-101 decade counter/timer with an APS-101 power supply.

RESUME

Ce travail porte sur les difficultés rencontrées par des étudiants lors de l'étude de situations physiques où interviennent les phénomènes de frottement de glissement (frottement cinétique) et de frottement de non glissement (frottement statique) entre les zones de contact non lubrifiées des solides en présence (frottement solide sec).

La recherche prend appui sur une "analyse a priori" (l'étude du frottement du point de vue physique et du point de vue didactique, une mini-enquête exploratoire, des observations empiriques en classe au cours d'un enseignement sur les frottements et une analyse partielle du manuel de référence utilisé par les étudiants et les professeurs) où un certain nombre de questions et d'hypothèses de travail sont explicitées. La deuxième partie est consacrée à l'analyse des résultats de questionnaires papier-crayon proposés à des populations différentes (différents pays d'origine et différents niveaux d'études), questionnaires construits afin de tester nos hypothèses. Ces analyses aboutissent à une description aussi synthétique que possible des idées et des raisonnements des étudiants sur le frottement solide.

Les raisonnements des étudiants ont les caractéristiques principales suivantes: tout se passe comme s'il existait, pour les étudiants, un phénomène unique de frottement (non-distinction entre frottement statique et frottement cinétique) représenté par une résultante unique des forces de contact (non-application de la troisième loi de Newton), résultante localisée à l'interface ("entre" les solides) et qui n'agit que sur le solide qui se trouve au dessus de l'interface (effet dessus-dessous). Cette force unique a un sens bien défini, déterminé à partir du sens des mouvements effectifs (donnés) des solides étudiés: cette force unique s'oppose toujours aux mouvements effectifs ou "vrais" des solides (les mouvements relatifs des solides ne sont pas pris en compte).

Le frottement fonctionne, pour les étudiants, comme s'il existait entre les solides en contact un "lien" qui assure une certaine "adhérence" entre ces solides, "adhérence" qui d'une part freine les solides (effet résistif: il est impossible que la force de frottement ait un rôle moteur) et qui, d'autre part, permet à un solide "passif" d'être entraîné par le solide "moteur" sans que ne s'exerce explicitement sur lui une force dans le sens du mouvement (effet d'entraînement).

Une troisième étape consacrée à l'étude critique d'un assez grand nombre de manuels de différents types d'enseignement (secondaire, technique et supérieur) montre que la grande majorité des manuels n'aide vraiment pas les étudiants à remettre en cause leurs idées sur le frottement solide et, même souvent, contribue à les renforcer.

La dernière partie du travail concerne quelques suggestions pédagogiques sur des points "délicats" dégagés au cours de la recherche, suggestions qui sont aussi un plaidoyer en faveur d'un enseignement plus complet et moins ambigü sur le phénomène de frottement solide sec.